

Radiometrinen tiiviysmittauslaitteiden käyttäminen päällysteiden tyhjätila- mittauksiin

Tielaitos

TIEL/20

TUTKIMUS RADIOMETRISISTÄ T
IIVIYSMITTAUSLAITTEISTA

07.04.1994 KK 21

Asian tun:1594/93/20/TIEL

Ark=KK Säil=20 Tärk=

Liite 1/1



Tielaitoksen
selvityksiä

11/1994

Helsinki 1994

Kehittämiskeskus

Tielaitoksen selvityksiä
11/1994

Hannu Aurinko

**Radiometrinen tiiviysmittauslaitteiden
käyttäminen päällysteiden tyhjätila-
mittauksiin**

Tielaitos
Kehittämiskeskus

Helsinki 1994

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8746-3
TIEL 3200222
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1994

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotepalvelut
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

Asiasanat: tiiviysmittaus, tyhjätila radiometrinen, Troxler, DOR

Tiivistelmä

Tielaitoksen kehittämiskeskuksen ja Laatuinsinöörit Oy:n toimesta perustettiin työryhmä keväällä 1993 tutkimaan radiometrinen tiiviysmittauslaitteiden soveltumista päällysteiden tyhjätilamäärittäykseen. Työryhmän tavoitteena oli laatia raportti, jossa käsitellään yleisimpiä käytössä olevia mitta-reita Suomessa ja muissa pohjoismaissa. Mittareista laadittiin yleiskuvaus ja selvitettiin niiden käyttöön liittyviä yksityiskohtia ja soveltuvuutta päällysteiden tyhjätilamäärittäykseen.

Tutkimuksessa käytettiin Troxler 4640 B ohutkerrosmittaria ja DOR 1000 -mittaria, joilla tutkittiin eri päällystetyyppejä useilla työmailla Lapin -, Oulun - ja Uudenmaan tiepiirien alueella. Mittarit ovat toimintaperiaatteeltaan saman tyyppisiä. Kummankin mittaustulos perustuu takaisinsirontamennetelmään. Saatuja mittaustuloksia verrattiin keskenään ja porapaloista määritettyyn tyhjätilaan.

Kummallakin laitteella pystytään suorittamaan pistemittauksia, joita voidaan rinnastaa lähinnä porapaloista saatavaan tulokseen. Mittaustulokset voidaan tallentaa laitteen muistiin ja tulostaa myöhemmin paperille tai siirtää tietokoneelle. DOR-mittarilla voidaan suorittaa myös jatkuvia mittauksia, jolloin laite rekisteröi metrin välein tyhjätila-arvon tallentimeen. Tulokset on nähtävissä reaaliaikaisesti tallentimen näytöltä, josta ne voidaan siirtää kannettavaan mikeroon ja tulostaa numeerisena tai graafisena datana.

Mittaustulokset korreloivat porapaloista määritettyihin tyhjätiloihin nähden varsin hyvin ($r=0,70\ldots 0,88$), vastaavasti porapalojen keskinäinen korrelaatio oli $r=0,88$. Tulosten hajonta-arvot olivat porapaloihin nähden samaa suuruusluokkaa ($0,60\ldots 1,80$). Näiden perusteella laitteita pystytään käyttämään työmaalla ainakin työtä ohjaavana välineenä ja ehkä jatkossa myös laadunarvostelussa.

DOR-mittarilla pystytään jatkuvan mittauksen ansiosta muodostamaan parempi kuva päällysteen tyhjätilavaihteluista eri kohdissa. Tulokset osoittavat, että tyhjätila vaihtelee huomattavan paljon lyhyilläkin välimatkoilla.

Keywords: density, voids, radiometric, Troxler, DOR

Abstract

The Road administration developing center and Laatuinsinöörit Oy builded a working group in spring 1993 to research how the radiometric gauges could be operated to define a asfalt layer density. One of the group's aims was to write a rapport of the most in common used gauges in Finland and other Nordic countries. This rapport includes discriptions and some details of the gauges and suitability to define detecting of the voids.

This rasearch was used Troxler 4640 B thin layer density gauge and DOR 1000 -gauge, which have been operated in different asfalt types in Lapland, Oulu and Uusimaa `s working sites. Function principales of the gauges are the same, the source transmitting radiation which reflects from asfalt layer to detector. The results of measuring was compared with each other and with core values.

Both of the gauges could do the spotmeasuring that gives similar values as the core. The results could be stored and print out later to paper or transport to computer. By DOR-gauge could be made also rolling measurements while the gauge stores the value of each meter. The result of measuring could be see all the time of the using unit screen while measuring.

The gauges results correlated quite well compareing to core values ($r=0,70...0,88$), the correlation between core values was $r=0,88$. The standard aviations of the gauges result and the core values were in the same level ($0,60...1,80$). By basing of these numbers the gauges could be used in the sites by guiding the rolling work and maybe in the future also criticizing the quality of the work.

By DOR-gauge, thanks to rolling measuring, could form better picture variation of the voids in different spots. The results shows that the voids could fluctuate remarkable in very short range. This is not be able to perveice in any spot measuring.

Alkusanat

Raporttia on valmistellut työryhmä, johon ovat kuuluneet tielaitoksen kehittämiskeskuksesta tieinsinööri *Mats Reihe* pj. ja ins. *Kalevi Toikkanen*, VTT:lta diplomi-insinööri *Vesa Laitinen*, Lapin tiepiiristä päällysteinsinööri *Kalevi Luiro*, Oulun tiepiiristä päällysteinsinööri *Esko Laitinen*, Oy E. Sarlin Ab:stä tuotepäällikkö *Peter Fellman*, Lemminkäinen Oy:stä filosofianmaisteri *Pertti Pohjola* ja Laatuinsinöörit Oy:stä diplomi-insinööri *Hannu Aurinko* siht. joka on kirjoittanut raportin.

Helsingissä 4. maaliskuuta 1994

Tielaitos, kehittämiskeskus

Sisältö	6
1 Johdanto	7
1.1 Tutkimuksen tarkoitus	7
1.2 Tutkimuksen laajuus ja tavoitteet	8
2 Laitekuvaukset	9
2.1 Troxler 4640 B	9
2.1.1 Normaalimittaus (Normal mode)	11
2.1.2 Avoimen pinnan mittaus (Surface voids mode)	11
2.2 DOR	12
3 Mittaukset ja tulokset	15
3.1 Miten laitteilla mitataan?	15
3.1.1 Troxler 4640 B	15
3.1.2 DOR	18
3.2 Tulokset	20
4 Tulosten analysointi	21
4.1 Troxlerin tulokset	21
4.2 DOR:in tulokset	28
5 Johtopäätökset ja suositukset	39

Lähteet

Liitteet

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tarkoitus

Tien päällystämässä on tiiviydellä suuri merkitys rakenteen kestävyys, kestoikään ja kustannuksiin. Tiivistystyön osuus päällystämisen kokonaiskustannuksista on vähäinen, kuitenkin tiiviydellä on huomattava vaikutus rakenteen laatuun.

Asfalttipäällysteiden tiiviys määritetään koekappaleen tyhjätilan avulla. Tyhjätilalla tarkoitetaan koekappaleen kaikkien komponenttien (ilman, kiviaineksen ja sideaineen) huokostilojen määrää ilmoitettuna prosentteina koko koekappaleen tilavuudesta. Tyhjätilan pitää olla sallittujen arvojen välillä, jotta:

Päällyste ei kulu eikä deformoidu.

Sideaine ei vanhenisi; vanhenemisen seurauksena sideaine kovenee ja tartunta sideaineen ja kiviaineksen välillä heikkenee.

Päällyste ei pääse kostumaan; suolavesi tunkeutuu huokosiin ja jäätyessään irrottaa kiviainesrakeita ja päällyste purkautuu.

Päällysteen tyhjätilan tutkiminen koekappaleista on hidas tutkimusmenetelmä. Poratut kappaleet lähetetään laboratorioon tutkittavaksi ja tulokset tyhjätilasta saadaan vasta muutamien päivien kuluttua. Pienemmissä päällystyskohteissa varsinainen työ on jo ehtinyt päättyä ennen kuin tulokset tyhjätilasta saadaan työmaalle. Nykyisten työselitysten mukaan kaikkein pienimmissä päällystyskohteissa, alle 1000 tonnia, ei tyhjätilaa kontrolloida ollenkaan./3/

Edellä mainitut tekijät ovat vaikuttaneet siihen, että on kehitetty erilaisia säteilyyn perustuvia ainetta rikkomattomia tyhjätilan määritysmenetelmiä. Tämän raportin tarkoituksena on antaa tietoa miten näitä mittausvälineitä pitäisi käyttää ja minkälaiset välineet soveltuvat päällysteiden mittaamiseen.

1.2 Tutkimuksen laajuus ja tavoitteet

Tutkimuksessa selvitettiin Troxler 4640 B - ja DOR 1000 -mittarin käyttömahdollisuuksia eri päällystetyypeillä. Tuloksia kerättiin pääosin Oulun -, Lapin - ja Uudenmaan tiepiirien alueelta. DOR - ja Troxler-mittareita verrattiin keskenään useilla työmailla Länsi-Uudellamaalla. Lisäksi tuloksia ja kommentteja on saatu norjalaisen Asfaltindustriens laboratorium:n tekemästä tutkimusraportista, Lemminkäinen Oy:n raportista "DOR-tiiviysmittarin esikokeilu kesällä 1993" sekä Esa Palmusen ja Jaakko Koivunurmen tekemistä insinööritöistä.

Mittareita kokeiltiin AB-, ABE-, SMA- ja emulsiomassoilla, ja saatuja tuloksia verrattiin koekappaleiden tuloksiin. Troxlerilla mittauksia suoritettiin n. 550 kappaletta 20 kohteessa. Niitä verrattiin 120 porakappaleeseen. DOR:lla mitattiin 8:ssa kohteessa jatkuvia mittauksia 2,3 km ja n. 80 piste-mittausta. Tuloksia verrattiin n. 40 porakappaleeseen, joita oli tutkittu kolmessa laboratoriossa. Tutkimuskohteissa päällysteiden kerrospaksuudet vaihtelivat 2,5 - 5,0 senttimetriin.

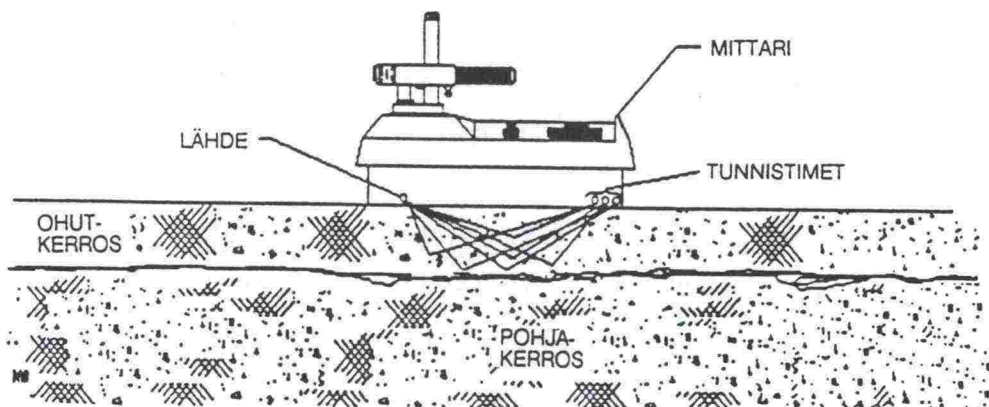
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää voidaanko radiometrisillä tiiviysmittauslaitteilla ohjata tiivistystyötä päällystämisen aikana ja pystytäänkö luotettavasti arvostelemaan lopputuotteen laatua.

2 LAITEKUVAUKSET

2.1 Troxler 4640 B

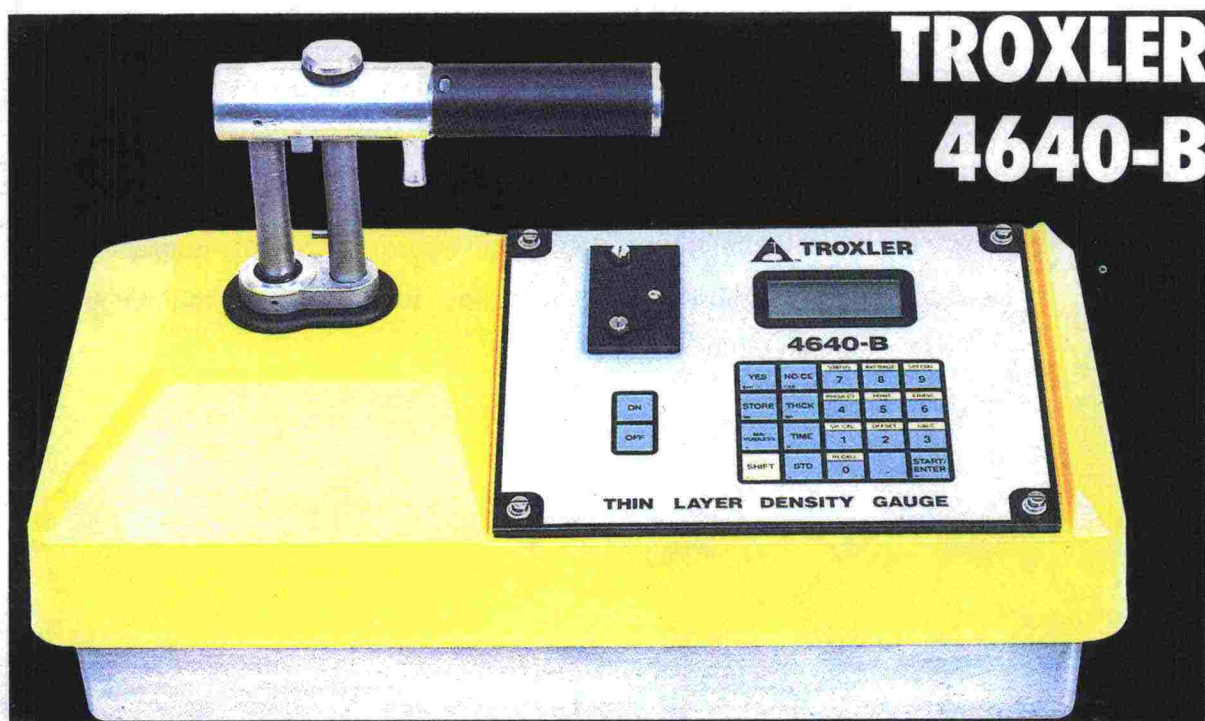
Troxler 4640 B on radiometrinen ydinsäteilyyn perustuva mittauslaite, joka käyttää 30 vuoden puoliintumisajan omaavaa Cesium 137 gamma-säteilylähdettä. Laite mittaa päällysteen yläkerroksen tiheyttä käyttäen 8 mCi Cesiumsäteilylähdettä ja G-M-putkia./6/

Mittarin toiminta perustuu takaisin sirontaan, jossa eristeellä on estetty säteilyhiukkasten pääsy suoraan detektorille. Takaisin sirontatilassa hiukkasten on heijastuttava vähintään kerran ennen kuin ne saavuttavat tunnistimet. Hiukkaset, jotka saavuttavat G-M-tunnistimet, lasketaan määrätyn aikavälein; vastaanotettujen säteilyhiukkasten määrä on suorassa suhteessa tiheyteen. Mittarin ohjelma laskee automaattisesti mittausjaksojen tuloksista aineen pintakerroksen tiheyden.



Kuva 1. Troxlerin toimintaperiaate.

Laitteella voidaan mitata 2,54 – 10,15 senttimetrin paksuista päällysteker-
rosta ja mittausajaksi voidaan valita 0,5, 1,0, 2,0 tai 4,0 minuuttia. Mittaris-
sa on valittavissa kaksi mittaustapaa sekä lisäksi toisen tavan sovellutuk-
sena erikoiskalibroitu mitta.



Kuva 2. Yleiskuva troxler 4640 B -mittarista.

Cesium 137 radioaktiivinen lähde heikkenee noin 2,5 % vuosittain. Jos mittaria ei ole käytetty pitkään aikaan (yli 6 kuukautta) on syytä varmistua, että laitteen standardilukemat ovat oikeat. Muuten mittari voi antaa virheellisiä tuloksia.

Ennen mittausta pitää laitteeseen syöttää päällysteen Marshall- tai massan tiheys, jonka perusteella mittari laskee päällysteen tyhjätilan.

2.1.1 Normaalimittaus (Normal mode)

Valmistaja suosittelee normaalimittausta käytettäväksi tasaisilla, sileä pinta-
taisilla asfalteilla, joissa vähintään 40 % kiviaineksesta läpäisee 2,38 mm:n
seulan. Laite asetetaan suoraan tutkittavan päällysteen pinnalle ja valitaan
mittausaika sekä kerrospaksuus. Mittarilla olisi syytä tehdä ns. testimitta-
uksia, jotta selvitetäisiin oikea mittaustapa.

2.1.2 Avoimen pinnan mittaus (Surface voids mode)

Valmistaja suosittelee tätä mittaustapaa käytettäväksi avoimille ja karkea-
pintaisille asfalteille. Tällaisia massoja ovat mm. SMA- ja ABE-tyyppiset
päällysteet, joissa on "suuria" kivirakeita ja alhainen hienoainesmäärä.
Päällysteen pinnalle asetetaan 2,5 cm:n paksuinen magnesiumlevy, jonka
päältä mittaaminen suoritetaan. Mittarista valitaan erikseen tämä mittaus-
tapa, jolloin päällysteen kerrospaksuutta ei tarvitse erikseen valita vaan
laite käyttää ns. standardivahvuutta.

Mittariin on valmiiksi kalibroitu päällysteen tiheys $2\,243\text{ kg/m}^3$. Jos mitatta-
van päällysteen tiheys poikkeaa selvästi tästä lukemasta, pitäisi tehdä eri-
koiskalibrointi mitattavalle päällysteelle. Erikoiskalibrointi voidaan tehdä
kaikille päällysteille riippumatta pintarakenteesta. Mittari kalibroidaan mit-
taussarjan avulla lähemmäksi päällysteen todellisia arvoja. Tiheyden ka-
librointialue on $1\,600\text{...}2\,700\text{ kg/m}^3$.

Mittaustulokset voidaan tallettaa laitteen muistiin, johon mahtuu 100 000
merkkiä l. 750 mittausta, ja tulostaa kirjoittimelle. Tallennettavaan tietoon
voidaan lisätä numerokoodeja tunnistamisen helpottamiseksi./6/

2.2 DOR-1000

DOR -mittari on radiometrinen ydinsäteilyyn perustuva mittauslaite, joka käyttää 30 vuoden puoliintumisajan omaavaa Cesium 137 gamma -säteilylähdettä. Laite mittaa tiivistettyjen maakerroksien ja ohuiden päällystekerroksien tiheyttä käyttäen 10 mCi Cesiumsäteilylähdettä ja G-M-putkia. Mittari perustuu vastaavanlaiseen takaisin sirontamenetelmään kuin Troxler -mittari./1/

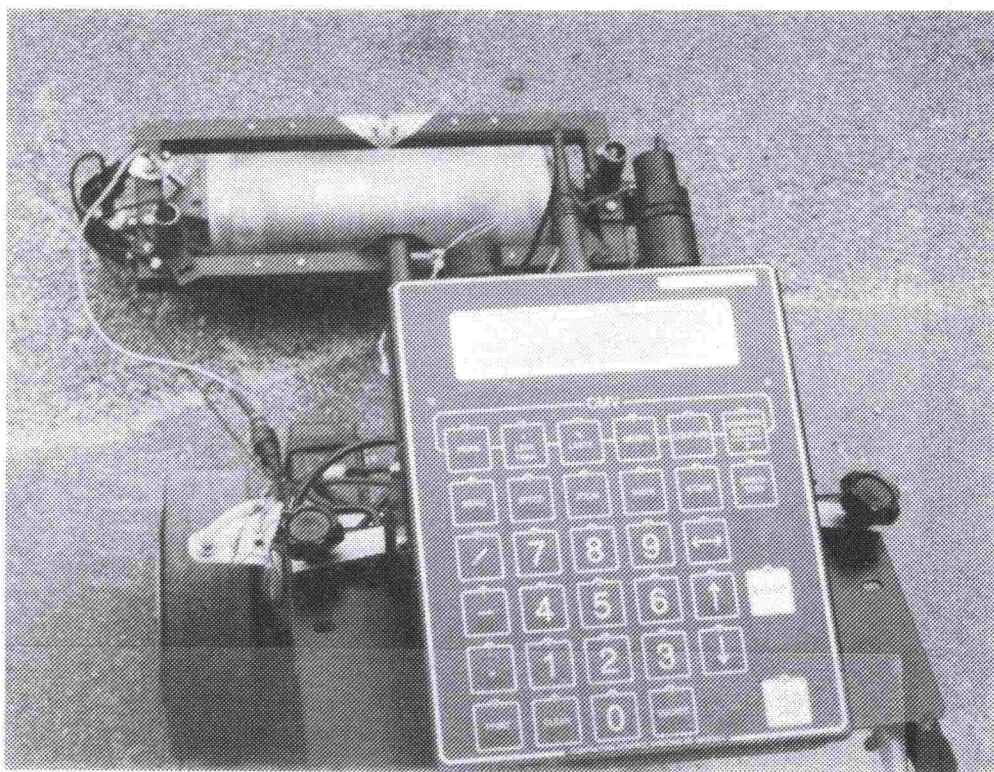


Kuva 3. Yleiskuva DOR-mittarista.

Laitteella pystytään suorittamaan sekä piste- että jatkuvia mittauksia. Laitteistoon kuuluvat ohjainyksikkö I. tallennin, teline ja kartion muotoinen mitausyksikkö. Ohjainyksikössä on 36 kappaletta selkeitä käyttöpainikkeita, joissa on teksti englanniksi, ruotsiksi tai suomeksi, sekä nelirivinen nestekidenäyttö, josta käyttäjä voi seurata mittaustuloksia reaaliaikaisesti. Näytölle sopii yhdellä kertaa 500 metrin pituisen mittausmatkan tulokset. Tallentimeen voidaan syöttää n. 50 km:n mittaustulokset, jonka jälkeen ne on siirrettävä tietokoneeseen tai levykkeelle.

Teline voidaan kiinnittää puutarhatraktoriin, jyrään tai maastoauton puskuuriin, jolloin voidaan suorittaa yhtäjaksoisesti pitkiäkin mittauksia.

Kartion tai valssin halkaisija on 15 cm ja pituus 41 cm. Mittausdata siirretään valssilta ohjainyksikköön, jossa se muutetaan selväkielisenpään muotoon ja tallennetaan muistiin. Mittauksia voidaan tehdä luotettavasti 80...90 mm:n vahvuisiin kerroksiin asti. Laitteeseen ei tarvitse erikseen syöttää päällysteen kerrosvahvuutta vaan mitattavan materiaalin yleistyyppi; asfaltti tai tiivistetty maakerros.

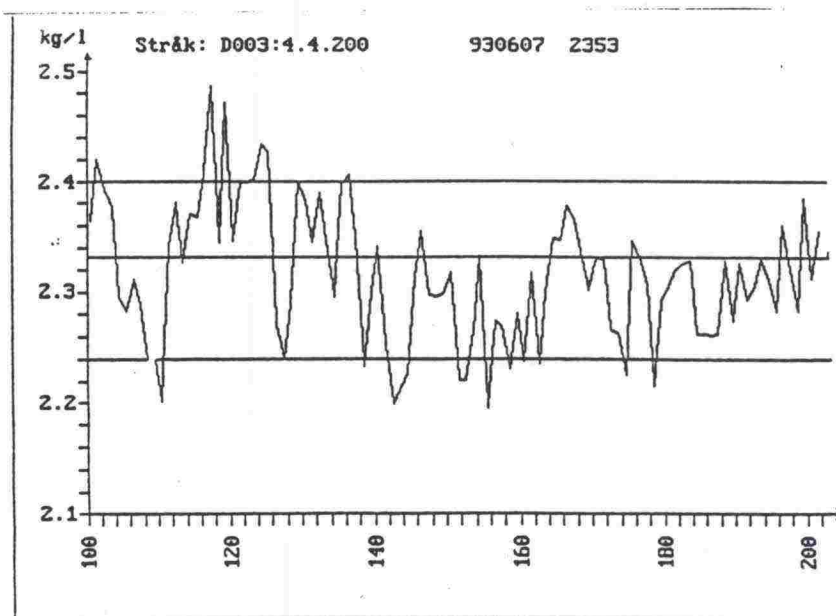


Kuva 4. DOR -mittarin tallennin.

Ennen mittausta mittari kalibroidaan aina taustasäteilyn ja mitattavan päällysteen tiheyden suhteen sekä mittausetäisyydelle. Kalibrointia varten mittariin syötetään alkuarvoina massantiheys ja mitattavan kohteen tunnus, esim. tien- ja tieosanumero sekä aloituspaaluluku.

Mittaaja pystyy seuraamaan mittauksen aikana reaaliaikaisesti tuloksia näytöltä ja mittauksen päätyttyä tulokset voidaan siirtää suoraan kannettavaan mikeroon, jonka ruudulle tai paperille voidaan piirtää esim. mittausmatka ja tyhjätilaa kuvaava grafiikkakäyrä. Tulosteet saadaan sekä graafisesti että numeerisesti.

Tietokoneohjelman avulla saadaan mittauksista selville yksittäiset arvot, mittausvälin keskiarvo ja keskihajonta sekä minimi- ja maksimiarvot ja niiden sijainti.



Kuva 5. Kuvassa on esimerkki graafisesta tulosteesta, jossa tyhjätila on mittausmatkan funktiona.

3 MITTAUKSET JA TULOKSET

3.1 Miten laitteilla mitataan?

Kummatkin laitteet ottavat käyttövoimansa radioaktiivisesta isotoppista, joka on terveydelle haitallista. Erityisen tärkeää on noudattaa turvallisuusluvan määräyksiä ja ohjeita siitä, kuinka kauan ja miltä etäisyydeltä laitetta saa yksi henkilö tietynä ajanjaksona käyttää. Mittareita pitää säilyttää annettujen ohjeiden mukaisesti niille varatuissa paikoissa, riittävän etäällä toisistaan kuivassa ja ilmastoidussa tilassa. Jos radioaktiivisten laitteiden kanssa on tekemisissä säännöllisesti, pitäisi käydä tarkistuttamassa säteilymäärä vähintään kerran vuodessa.

Radioaktiivisia mittauslaitteita ei saa huoltaa ilman maahantuojaan antamaa koulutusta. Mikäli mittarissa ilmenee jotakin normaalista poikkeavaa on asiasta **välittömästi** ilmoitettava laitteen maahantuojaalle tai oman yrityksen "vastaavan johtajan tutkinnon" suorittaneelle henkilölle.

3.1.1 Troxler 4640 B

Mittari ei ole huoleton mittauslaite, jolla kuka tahansa asiaa tuntematon mittaaaja pystyisi saamaan luotettavia tuloksia päällysteen tiheydestä, vaan laitteen käytön kanssa on oltava erittäin huolellinen. Käsitys, jonka mukaan laitteella voidaan seurata päällysteen tyhjätilaa muun työn ohella, on täysin virheellinen. Käyttäjän on paneuduttava mittaustyöhön täysipainoisesti, jotta saadut tulokset olisivat luotettavia ja niihin voitaisiin tarvittaessa suhtautua myös kriittisesti.

Mittari on hyvin harvoin virheen lähde. Ainoastaan kosteuden sekä alhaisen tai korkeiden lämpötilojen vaikutuksesta mittari saattaa aiheuttaa tulokseen virhettä. Yleensä virheen aiheuttaa mittaaaja omalla huolimattomuudellaan. Yleisin virhe on asettaa mittari epätasaiselle alustalle, jolloin tulos on selvästi liian alhainen. Vastaavanlainen tilanne on, jos laite asetetaan kohtaan, josta on irronnut kivirakeita. Nämä ongelmat tulevat yleensä esiin, kun mitataan kylmän päällysteen päältä. Kuumaa päällystettä mitattaessa voidaan mittaria painaa kevyesti, jolloin se asettuu tasaisemmin

päällysteen pinnalle. Mittari voi antaa myös liian suuria tiheysarvoja, jos se asetetaan kohtaan, jossa bitumi on noussut pintaan.

Mittaustulokseen vaikuttavat yleensä voimakas värinä ja suuret metalliesineet mittaustaikojen lähistöllä, kuten jyrät. Kuitenkaan henkilöauto ei aiheuttanut virheitä mittaustuloksiin.



Kuva 6. Kuvassa on esimerkki mittarin sijoittamisesta päällysteen päälle. Mittari on sijoitettu tasaiselle alustalle, josta ei ole irronnut massaa.

MITTAUKSET JA TULOKSET

Märkä tai jäätnyt päällyste antaa huomattavasti liian suuria tiheysarvoja, koska päällysteen tyhjätilahuokokset ovat täyttyneet vedellä. Kylmä tai jäätnyt päällysteenpinta johtaa kylmää myös mittariin ja saattaa aiheuttaa mittarin näppäimistön jäätymisen.

Jos mittari on kostunut tai jäätnyt voi ohjauspanelin irrottaa ja johtaa lämmintä ilmaa esim. hiustenkuivaajalla tai auton sisätilan lämmittimellä ohjauspanelin alapuolella oleviin mikropiireihin. Tässä toimenpiteessä on oltava erittäin huolellinen, etteivät piirikortit vahingoitu. Valmistaja ei suosittele käytettäväksi mitään nestemäistä kosteuden poistajaa.

Valmistajan antamien ohjeiden mukaan, jokaisen virrankatkaisun jälkeen pitäisi uudelleenkäynnistyksen yhteydessä ottaa vähintään yksi standardilukema. Tämän avulla voidaan tarkistaa onko laite alustanut itsensä oikein ja onko aikaisemmin mitatut standardilukemat säilyneet mittarin muistissa. Jos laite on ollut pitkään käyttämättä, esim. talven ajan, pitäisi sen muistiin ottaa uudet lukemat.

Mittaustapana kannattaa **aina** käyttää erikoiskalibrointia, koska tuolloin päästään lähemmäksi päällysteen todellista tiheyttä. Kalibrointimittausten määrä kannattaa valita riittävän suureksi, vähintään 6...10 mittauskertaa, jotta saadaan todenmukainen kuva päällysteen tiheydestä. Mittauskohdat on valittava erittäin tarkoin, että saadaan keskimääräinen tulos päällysteen tiheydestä. Erikoiskalibrointi mittausten jälkeen mittari "kysyy" koekappaleen tiheyttä, johon se vertaa mittaustuloksia ja suorittaa arvojen keskinäisen kompensaation.

Mittauspaksuutena kannattaa käyttää koko kerroksen paksuutta, josta vähennetään puoli senttimetriä. Näin vältetään virheellisiltä tuloksilta, koska päällysteen kerrospaksuus vaihtelee hiukan eri mittauskohdissa.

Avonaisen päällysteen pinta voidaan täyttää fillerillä tai hienolla hiekalla, tämä menetelmä ei kuitenkaan vaikuttanut tämän tutkimuksen tuloksiin./6/

3.1.2 DOR

Mittaria voidaan käyttää sekä jatkuviin että pistemittauksiin. Ennen varsinaisten mittausten aloittamista joudutaan laite kalibroimaan taustasäteilyn ja päällysteen tiheyden suhteen sekä jatkuvaa mittausta varten myös etäisyydelle. Kalibroitua varten syötetään alkuarvona laboratoriokokeista saatu päällystemassan tiheys, jonka perusteella päällysteen tyhjätila laskeaan. Referenssiarvo ei ole mittausten kannalta välttämätön, mutta se helpottaa tulosten analysointia työmaalla. Näiden toimenpiteiden tekeminen kestää yleensä 30...60 minuuttia. Tämän jälkeen voidaan aloittaa varsinaiset mittaukset .

Laitteen valmistaja suosittelee, että pistemittauskohdista päällysteen pinta tasoitetaan fillerillä ennen mittausta. Tämän menetelmän tarkoituksena on eliminoida päällysteen pinnan epätasaisuudesta johtuva tyhjätila pinnan ja kartion välistä. Menetelmästä on saatu hyviä kokemuksia norjalaisten tekemästä tutkimuksesta, ja sitä käytettiin myös tämän tutkimuksen pistemittauksissa .

Jatkuvaa mittausta varten joudutaan mittaamaan yksi edestakainen 50 metrin kalibroitimittaus samalta linjalta. Lisäksi mittalinjalta tehdään 4...10 pistemittausta, jotka ovat 3...5 tuloksen keskiarvoja ja mittausaika yhdelle mittaukselle on 60 sekuntia. Tuloksia käytetään mittarin kalibroinnissa pintavirheiden korjauksiin. Mikäli päällyste ei ole pinnaltaan tasalaatuinen, on pintavirhekalibrointi tehtävä useammasta kohdasta tarkastelu alueelta./1,2/

Mittariin pystytään syöttämään neljä raja-arvoa tai väliä, jotka vastaavat eri tyhjätila-arvoja. Mittarin näyttöruudulle tulee tulostetta koko mittauksen ajan, jota käyttäjä voi seurata reaaliaikaisesti. Tulosteet tulevat neljänä erilaisena merkinä (x/#_), joilla on oma tyhjätila-arvonsa tai -väli. Merkkejä on huomattavasti helpompi seurata mittauksen aikana kuin lukuarvoja ja yhdellä kertaa näytölle sopii 500 metrin mittaukset.

DMSI FTSRAPPORT. SALINVESTOLVA

CCS - International AB

Datum: 1994-01-03

Via: 14:25

Lager: Asphalt

ZOOM GRANER:
7:40a Cx Till 5:00a

[illegible]

Mittausten jälkeen tulokset siirretään tietokoneeseen, jossa niitä voidaan käsitellä graafisesti tai numeerisesti taulukoituna. Graafisessa tulosteessa voidaan mittaustiheys valita lähes rajattomasti, kuitenkin käytännössä 5...20 metrin mittaustiheydet ovat osoittautuneet tulosten tulkinnan kannalta parhaiksi. Tiheä mittauskanta vaikeuttaa graafisen tuloksen tulkintaa esim. 500 metrin mittausmatkalla.

Suurempia mittaustiheyksiä voidaan käyttää yksittäisten suurien poikkeamien tai mittaussiikkien paikantamiseen ja virhelähteen määrittämiseen. Tulosteisiin voidaan valita mittaussmatka 20 metristä alkaen l. voidaan zoomata käyrää. Tulokset voidaan siirtää myös yleisimpiin taulukkolaskenta ohjelmiin./1,2/

MITTAUKSET JA TULOKSET

3.2 Tulokset

Taulukossa 1 on esitetty Troxlerin ja DOR:n mittauspaikat, tienumerot ja päällystetyypit.

Taulukko 1. Troxler- ja DOR-mittausten suorituspaikat.

Kohteen nro	Tien nro	Paikka	Pääll. tyyppi	Troxler	DOR
300	Vt 21	Napapiiri- Korpikoski	AB 18/100	X	
351	Vt 4	Rovaniemi- Saarenkylä	SMA 18/100	X	
353	Mt 9442	Nivavaaran maantie	AB 20/120	X	
186/kohde 1	Mt 186	Inkoo-Salo	AB 18/105	X	X
113/kohde 4	Mt 113	Siuntio - Solvik	AB 16/108 MP	X	X
53/kohde 2	Kt 53	Mustio	SMA 18/105	X	X
4	Vt 4	Kello - Räinänperä	SMA 18/120	X	
21	Vt 21	Kukkola	AB 18/90	X	
350	Vt 4	Rovaniemi- Saarenkylä	SMA 18/100	X	
120/kohde 3	Mt 120	Helsinki - Oikkala	AB 18/60 TASK	X	X
kohde 6		Virkkala - Inkoo	AB16/108 MP	X	X
Kohde 7		Kontulantie	ABE20+		X
Kohde 8		Mellunmäen tie	AB 20/IV		X

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

4.1 Troxlerin tulokset

Troxler-mittauksista saatuja tuloksia on verrattu Lemminkäisen, Tielaitoksen ja Helsingin kaupungin laboratorioissa määritettyihin tyhjätilatuloksiin sekä DOR-mittarilla tehtyihin piste- ja jatkuviin mittauksiin. Lapin – ja Oulun tiepiireissä tehtyjä Troxler-mittauksia on analysoitu myös massatyyppi-kohtaisesti, AB- ja SMA-massatyypeittäin.

Tulosten korrelaatiot ja riippuvuudet vaihtelevat jonkin verran eri laboratorioissa tehtyjen tutkimusten kesken. AB-massatyypeillä korrelaatiot vaihtelevat 0,78...0,90 välillä. Parhaiten troxler-mittaukset ovat korreloineet Tielaitoksen tai Helsingin kaupungin laboratorioissa tehtyjen tyhjätilamääritysten kanssa. Lähes samaan korrelaatioon ($r=0,85$) päästiin myös Lemminkäisen laboratoriossa tehdyillä tutkimuksilla. Huonoin yhteys Troxler-tulosten ja porapaloista määritetyn tyhjätilan välillä oli Lapin – ja Oulun tiepiireistä määritetyillä SMA-massoilla, minkä keskinäinen korrelaatio oli vain $r=0,65$.

Tutkimuksen aineistoa on käsitelty kahdella eri tavalla, joka todennäköisesti vaikuttaa Troxler- ja porapalatulosten korrelaatioihin. Lapin – ja Oulun tiepiirien alueelta tehtyjä mittauksia on tarkasteltu yksittäismittauksina ja muut mittaukset on käsitelty tarkkailukohdan neljän tai useamman mittauksen keskiarvona. Tämä menettely parantaa osaltaan tulosten korrelaatiota, mutta ei keskinäistä riippuvuutta. Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty Troxler- ja porapalatulosten tyhjätilan korrelaatiokertoimet ja riippuvuudet.

Taulukko 2. Troxler- ja porapalatulosten tyhjätilan korrelaatiokertoimet.

	AB-massa	SMA-massa	LOY lab.	TIEL/HKR lab.	
		a			
Troxler	0,78	0,65	0,85	0,90	korrelaatio

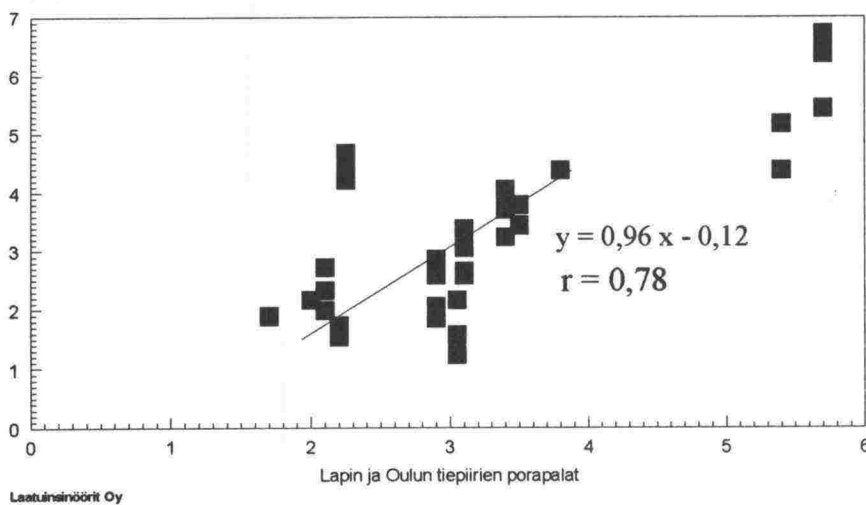
Taulukko 3. Troxler- ja porapalatulosten välinen riippuvuus.

	Troxler
AB-massa	$y = 0,96 x - 0,12$
SMA-massa	$y = 0,70 x + 0,66$
LOY lab.	$y = 0,56 x + 0,81$
TIEL/HKR lab.	$y = 0,65 x + 0,44$
	riippuvuus

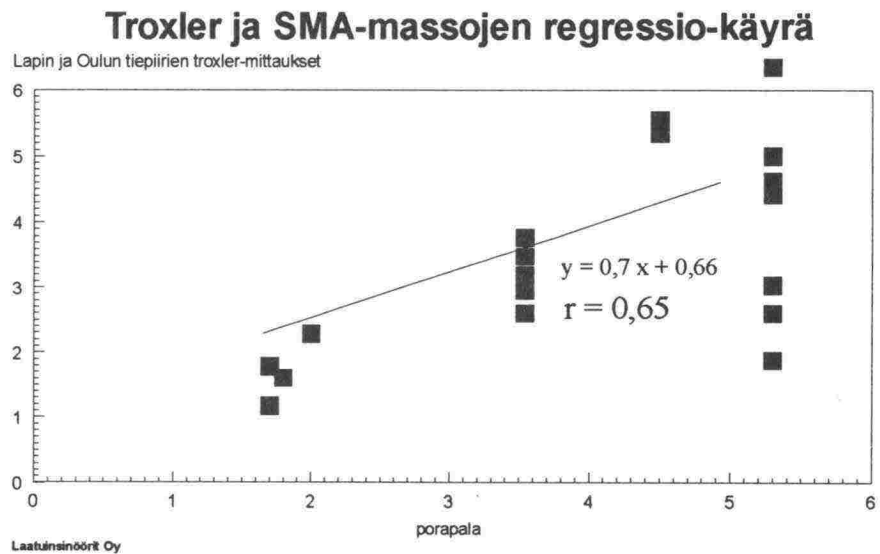
Tulosten keskinäiset riippuvuudet ovat parhaimmillaan, kun tyhjätila on 2...4 % välillä. Tämän osoittaa myös kuvien 8, 9, 10 ja 11 regressio-kuvaajat.

Troxler ja AB-massojen regressiokäyrä

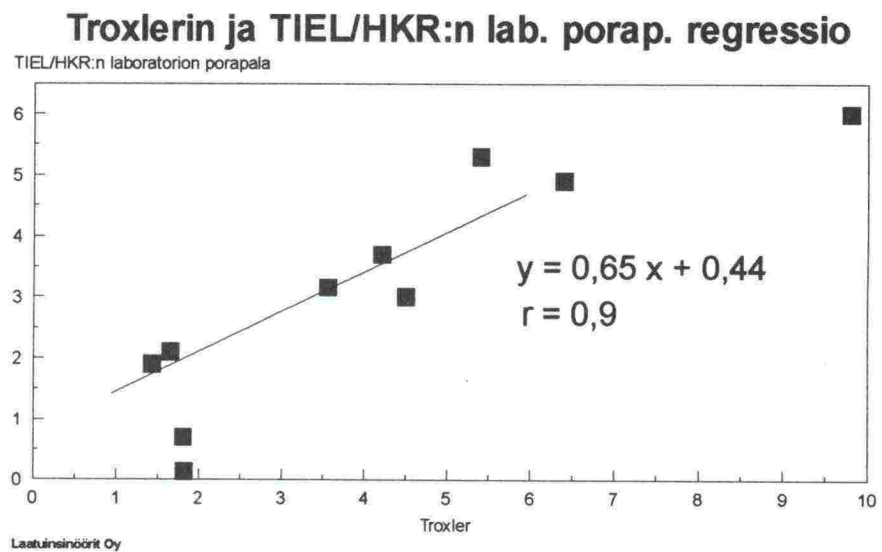
Lapin ja Oulun tiepiirien troxler-mittaukset



Kuva 8. Troxler ja AB-massojen regressiokäyrä.



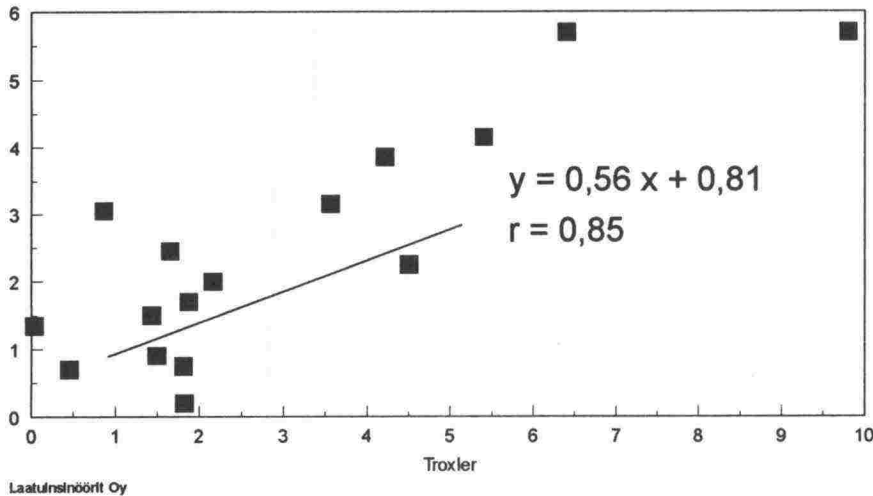
Kuva 9. Troxlerin ja SMA-massojen regressiokäyrä.



Kuva 10. Troxlerin ja TIEL/HKR:n laboratorion porapalojen regressio.

Troxlerin ja Lemm. lab. porapalojen regressio

LOY:n laboratorion porapala



Laatunsiirto Oy

Kuva 11. Troxlerin ja Lemminkäisen laboratorion porapalojen regressio.

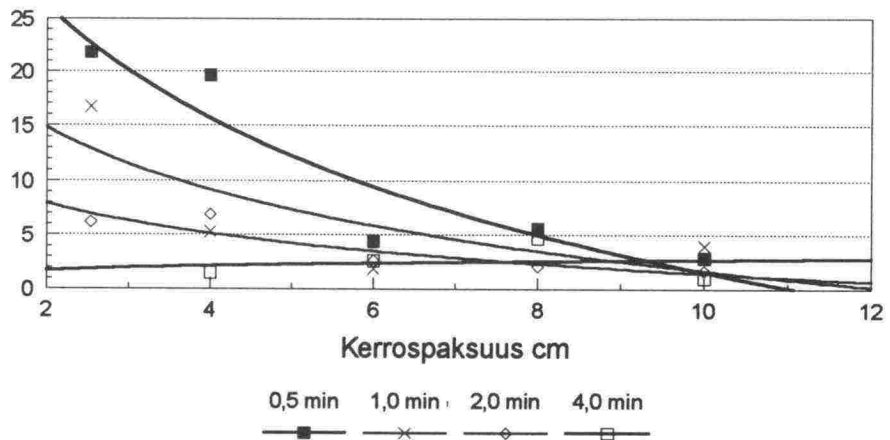
Regressiokuvaajasta voidaan selvästi havaita, kun tyhjättila-arvo kasvaa 4 % suuremmaksi ei tuloksia voida verrata enää keskenään. Tämä johtuu siitä, että pinnan avoimuus tai lajittunut päällyste päästää säteilyn lävitseen detektorille tiivistä pintaa nopeammin, jolloin säteilyn kulkuaika lyhenee ja tyhjättila-arvo pienenee. Mittauksissa on kokeiltu erilaisia pinnan täyteaineita, joiden tarkoituksena on korjata virheellisiä tuloksia lähemmäksi oikeaa tulosta, mutta tässä tutkimuksessa menetelmä ei vaikuttanut tuloksiin. Tulosten keskihajonta AB-massoilla oli porapalatulosten kanssa samaa suuruusluokkaa 0,60...0,80 tyhjättila-%.

SMA-massoilla tulosten hajonta oli AB-massoihin verrattuna huomattavasti suurempaa. Tyhjättilan keskihajonta oli yli 1,50 %-yksikköä, joka merkitsee suhteellisenä erona lähes 30 %:tia. Tämä johtuu osittain siitä, että kyseessä on ns. avoinpintainen massa, jonka tyhjättila yleensä on 3...5 % välillä. Näillä tyhjättila-arvoilla alkaa mittaustulosten hajonta kasvamaan ja tuloksen luotettavuus pienenee. Pinnan avoimuudesta johtuen säteilyä pääsee lähteestä detektorille ns. "liian lyhyttä reittiä", mikä ei ole kulkenut mitattavan materiaalin läpi. Mittausten tulokset on liitteessä 1.

Tutkimuksessa selvitettiin kerrospaksuuden ja mittausajan vaikutusta tuloksiin. Kuvassa 12 on esitetty kerrospaksuuden ja mittausajan suhdetta tilavuuspainon keskihajontaa. Mittausaikakohtaiset kuvaajat on liitteessä 2.

Til. painon keskihajonnan suhde kerrospaksuuteen mittausaika 0,5...4,0 min.

Tilavuuspainon keskihajonta kg/m³



Laatuinsinööri Oy

Kuva 12. Troxlerin tilavuuspainon keskihajonnan suhde kerrospaksuuteen ja mittausaikaan.

Kuvaan on piirretty neljä käyrää, joiden mittausaika vaihtelee 0,5...4,0 minuuttiin. Kerrospaksuudet on mitattu kahden senttimetrin välein 2,54...10,16 senttimetrin väliltä, joka on samalla mittarin mahdollinen mitausväli. Troxlerin mittaustarkkuus on suoraan riippuvainen mitattavan kerroksen paksuudesta ja mittausajasta. Nykyisin käytettävillä kerrosvahvuuksilla (80...120 kg/m²) hajonta-arvot ovat viisi kertaa suurempia 0,5 minuutin mittausajalla verrattuna 4,0 minuutin mittauksiin. Tulosten hajonta taasaantuu kerrospaksuuden kasvaessa 9,0 senttimetriin, jolloin hajonta on lähes sama riippumatta mittausajasta.

Mittaus järjestettiin lähinnä laitteen sisäisen hajonnan selvittämiseksi ja samalla voitiin tarkistaa pitivätkö laitevalmistajan antamat toleranssit paikkaansa. Kokeessa mitattiin täsmälleen samoilta pisteiltä kaikki mittaukset, jolloin päästiin valmistajan ilmoittamiin hajonta-arvoihin. Käytännössä

tulosten hajonta on 3...5 kertainen testitulokseen verrattuna, joka johtuu päällysteen tiiviyden vaihteluista ja pinnan avoimuudesta eri mittauskohdissa. Kuvassa 12 olevat tilavuuspainon keskihajonta-arvot ovat lähinnä suuntaa antavia, koska tulosten hajonta on mittausten aikana huomattavasti suurempi.

Mittari soveltuu hyvin tiivispintaisten massojen tyhjättilan mittauksiin, joiden kerrospaksuudet ovat vähintään 4 senttimetriä tai suurempia. Mittausaika pitää olla vähintään kaksi minuuttia, jotta tulosten hajonta-arvot pysyisivät kohtuullisissa rajoissa. Tyhjättila-arvo kannattaa laskea 4...8 mittauksen keskiarvona tulosten hajonnasta riippuen.

Erikoiskalibroinnin jälkeen kannattaa suorittaa koemittauksia eri kohdista kaistaa ja vähintään 75...100 metrin matkalta, että mittaaja saisi jonkinlaisen "sormituntuman" päällysteen tiiviysvaihteluista.

Mittaustuloksiin on **aina** suhtauduttava varauksella, koska virheellisen mittauksen tekeminen on yleensä helpompaa kuin oikeiden. Mittaustulosten luotettavuus pienenee olennaisesti, kun päällysteen tyhjättila on 4 % tai suurempi, joka kannattaa ottaa huomioon. Tulosten analysointia helpottaa huomattavasti porapalasta määritetty tyhjättila-arvo, jota voi käyttää referenssiarvona.

Mittarin toistettavuus ei osoittautunut tässä tutkimuksessa kovin hyväksi. Kahden keskinäisen mittauksen ero, joka on tehty samalta mittauspisteeltä laitetta nostamatta, on 5...10 % luokkaa. Tähän ei pysty yksittäistä selitystä antamaan vaan tulosten keskinäinen ero saattaa johtua monesta pienestä yksittäisestä virheestä. Tästä syystä kannattaa tehdä samasta pisteestä tai alueelta useita mittauksia ja laskea tuloksista keskiarvo.

Troxler-mittarilla voidaan luotettavasti osoittaa tiivispintailla massoilla onko päällysteen tyhjättila-arvo tietyssä pisteessä 2...4 % välillä vai ei. Tarkeemman kuvan saaminen päällysteestä vaatii huomattavasti laajempia

TULOSTEN ANALYSOINTI

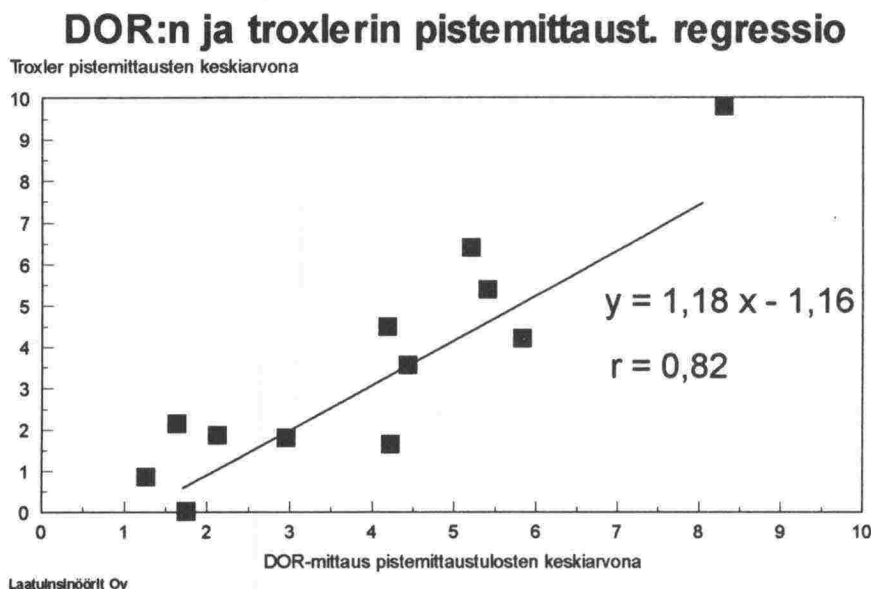
mittauksia, eikä sittenkään voida olla täysin varmoja tuloksesta, koska päällysteen tiiviys vaihtelee jonkin verran.

Avoinpintaisilla massoilla, kuten SMA-massalla, tulokset hajoavat selvästi enemmän, joka vaikeuttaa tulosten tulkintaa. Mittaria voidaan käyttää kuitenkin työtäohjaavana välineenä tiivistystyössä, mutta absoluuttisen arvon määrittäminen esim. SMA-massalle on lähes mahdoton tehtävä.

4.2 DOR:in tulokset

DOR-mittauksen tuloksia on verrattu Troxlerin tuloksiin ja eri laboratorioiden porapalasta määritettyihin tyhjätilatuloksiin. Lisäksi DOR:in tuloksia analysoitiin eri mittausaikojen keskiarvoina sekä jatkuvien että pistemittauksien osalta.

DOR:in ja Troxlerin pistemittaukset suoritettiin samoista pisteistä 3...5 mittauksen keskiarvoina. Tuloksista on laskettu riippuvuus ja korrelaatio, jotka on esitetty kuvassa 13.

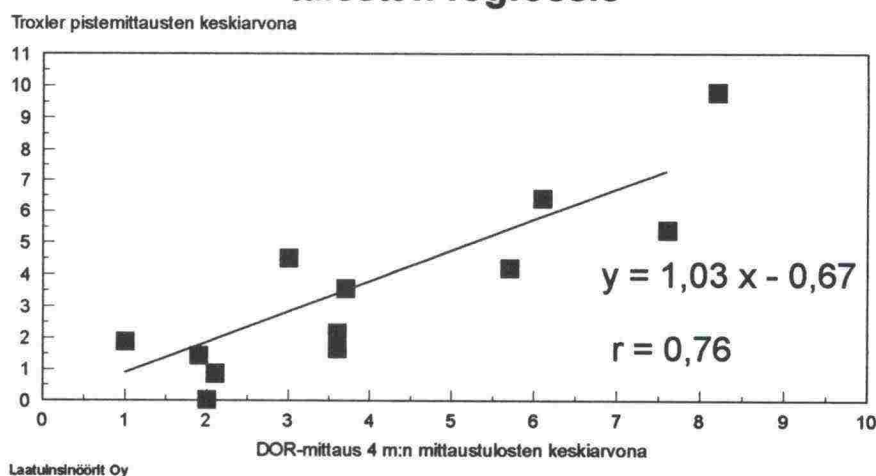


Kuva 13. DOR:n ja Troxlerin pistemittauksen regressio.

Tulokset korreloivat erittäin hyvin keskenään, joka osoittaa kummankin toimintaperiaatteen oikeellisuuden. Tulosten keskinäisiin eroihin vaikuttaa kuinka hyvin laitteet on asetettu samoihin mittauspisteisiin. Pistemittauksen suhteen laitteet ovat varsin tasaväkisiä keskenään, jonka osoittaa tulosten korrelaatiokerroin ($r=0,82$). Käytännössä Troxlerilla on helpompi tehdä mittausvirhe, koska DOR "nostetaan" pistemittauksen ajaksi telineelle päällysteen yläpuolelle ja Troxler asetetaan tasaisesti mitattavaa pintaa vasten.

Kuvassa 14 on esitetty DOR-mittauksen 4 metrin tulosten keskiarvo ja troxler-mittausten regressio.

DOR 4m keskiarvo ja troxlerin pistemittaus- tulosten regressio



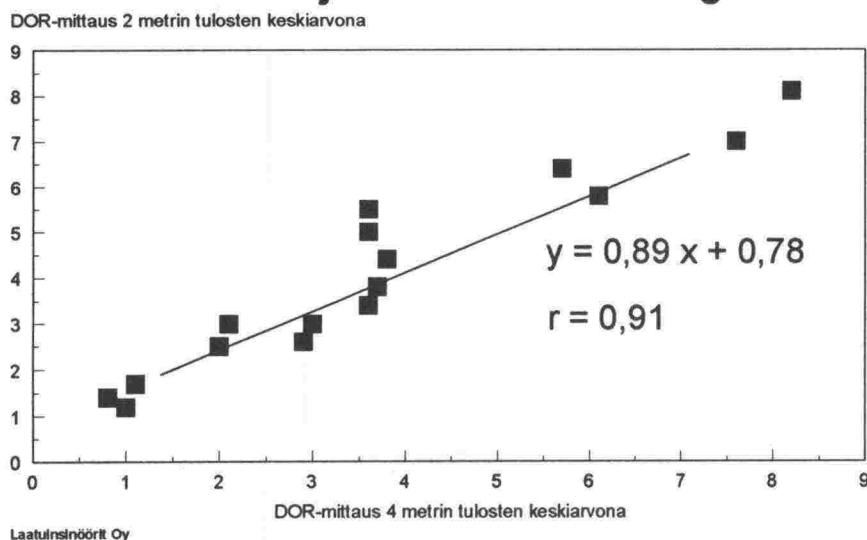
Kuva 14. DOR:n 4 metrin mittausten keskiarvo ja Troxlerin pistemittauks-
tulosten regressio.

Tulosten korrelaatio on edelleenkin kohtalaisen hyvä. DOR:n mittaustulok-
sia on kuitenkin huomattavasti helpompi analysoida, koska mittausten pe-
rusteella voidaan tulostaa käyrä, jossa tyhjätila on esitetty mitatun matkan
funktiona. Tulosteen avulla pystytään päällysteen tyhjätilasta saamaan
huomattavasti helpommin kokonaiskuva pistemittauksiin verrattuna. Mitta-
us voidaan suorittaa uudelleen samaan linjaa pitkin, jolloin pystytään var-
mentamaan keskiarvotuloksesta poikkeavat kohdat. DOR:n jatkuvan mitta-
uksen toistettavuus on tämän ja norjalaisten tekemän tutkimuksen perus-
teella osoittautunut erittäin hyväksi, josta on kuva liitteessä 3.

Kuvassa 15 ja 16 on esitetty jatkuvien ja pistemittausten keskinäistä kor-
relaatiota ja riippuvuutta. Kuvan 16 5 metrin mittaukset poikkeavat 2 ja 4
metrin mittauksista jonkin verran, koska 5 metrin tulokseen on laskettu vain
mittausvälin keskiarvoina. 2 ja 4 metrin tuloksiin on huomioitu porapalojen
kohdalla saadut tyhjätila-arvot. Regressiot osoittavat, että päällysteen pin-
ta ja tiiviys vaihtelevat varsin paljon hyvin lyhyilläkin välimatkoilla.

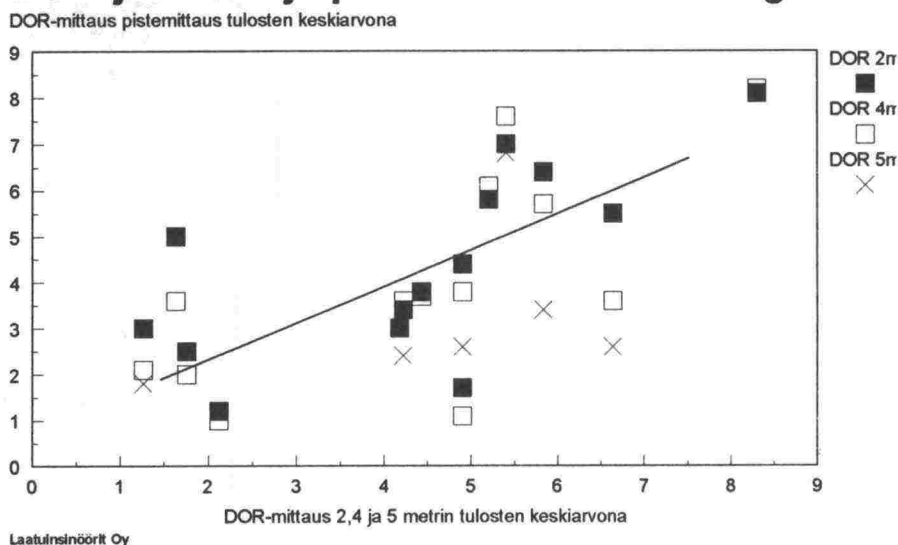
Vastaavan asian osoittaminen porapaloilla on huomattavasti hankalampaa, kuitenkin tämänkin tutkimuksen tulokset osoittavat porapalojen keskinäiset vaihtelut. Tyhjätila voi vaihdella 200 metrin matkalla 0,75...2.45 % välillä, esimerkki on kohteesta nro 4 Mt 113 Siuntio – Solvik.

DOR 4m ka. ja 2m ka. tulosten regressio



Kuva 15. DOR 2 ja 4 metrin mittausten keskiarvojen regressio.

DOR jatkuvan ja pistemittaus tulosten regressio

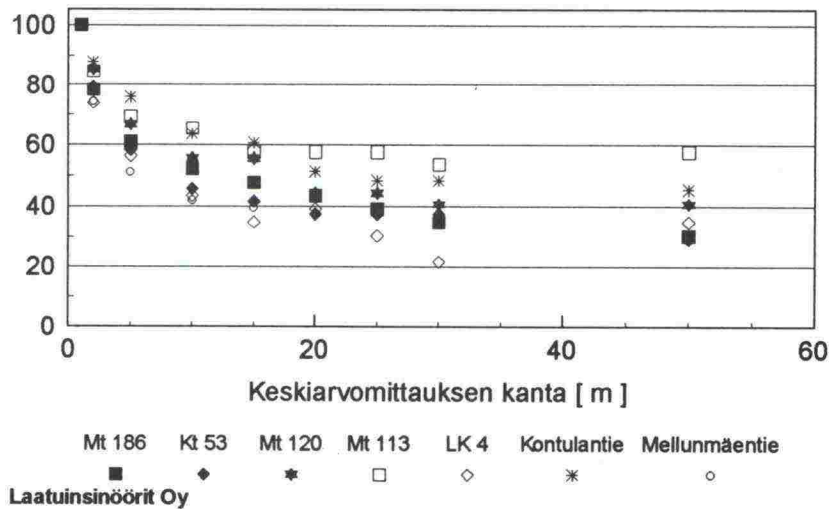


Kuva 16. DOR:n jatkuvan ja pistemittautulosten regressio.

Kuvissa 17 ja 18 on tarkasteltu jatkuvien mittausten keskiarvokantoja ja niiden muuttumista tarkastelutiheyden muuttumisen suhteen.

DOR-mittaustulosten hajonnan tarkastelu

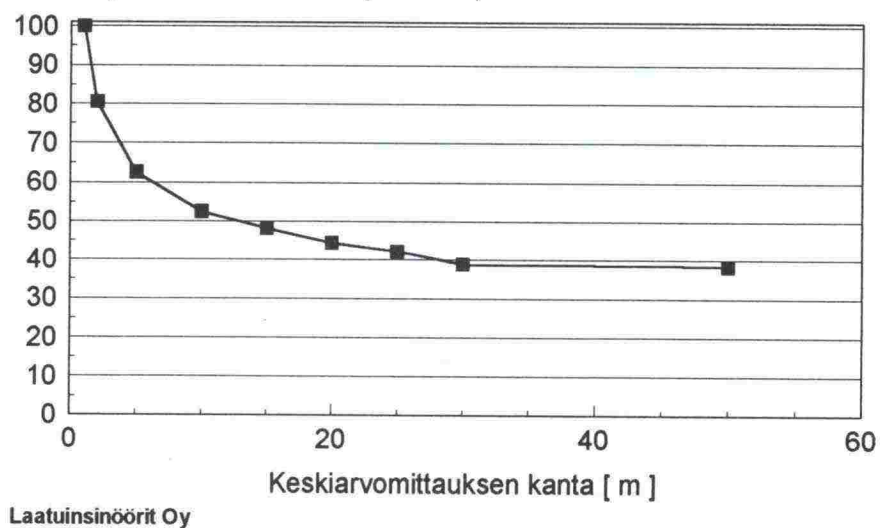
Keskihajonta % max. keskihajonnasta



Kuva 17. DOR-mittaustulosten hajonnan tarkastelu kohteittain.

DOR-mittaustulosten hajonnan tarkastelu

Keskihajonta % max. keskihajonnasta

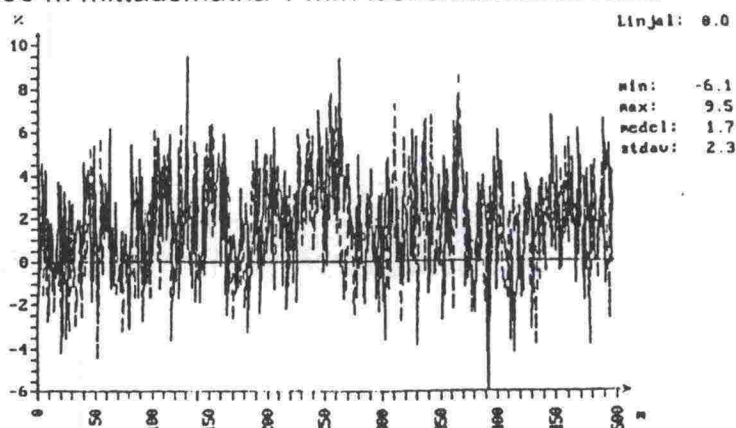


Kuva 18. DOR-mittaustulosten kohteiden keskiarvohajonnan tarkastelu .

Tulosten keskihajonta pienenee erittäin nopeasti, kun mittauksen tarkastelutiheyttä muutetaan 1:stä 20 metriin. Tämän tutkimuksen perusteella tulosten keskihajonta 20 metrin tarkasteluvälillä vastaa keskimäärin porapaloista määritetyn tyhjättilan keskihajontaa. Norjalaisen AIL:n tekemä tutkimuksessa mitatut keskihajonta-arvot ovat samaa suuruusluokkaa. Heidän tutkimuksessa tarkasteltiin tyhjättila-% sijasta päällysteen tilavuuspainoa.

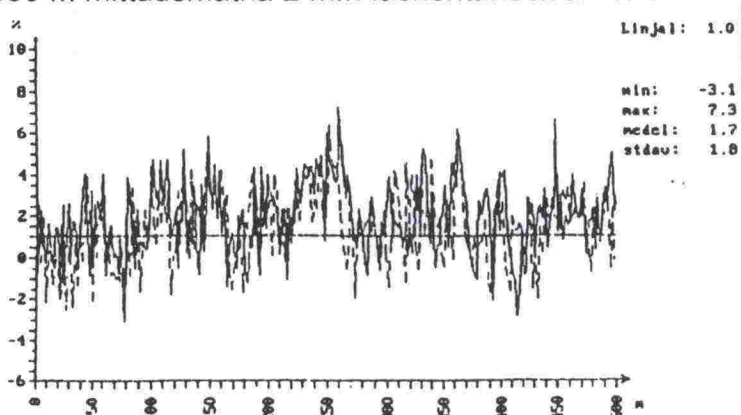
Mahdollisissa jatkotutkimuksissa suositellaan käytettäväksi 15...25 metrin tarkastelutiheyttä. Lopullisen päätöksen tarkastelutiheyden valinnasta voidaan tehdä työmaalla mittauksen jälkeen. Tärkein kriteeri tarkastelutiheyden valinnassa on tuloksen luettavuus, mistä ilmenee tyhjättilan keskimääräinen taso ja paikalliset poikkeamat. Tulosteista on malleja kuvissa 19, 20, 21 ja 22 ,joissa on 500 metrin mittausmatka tulostettu 1,2,5 ja 10 metrin tarkastelutiheyksinä . Mittauksia on suoritettu kaksi kertaa samalta linjalta, jolloin saadaan kuva myös mittauksen toistettavuudesta.

500 m mittausmatka 1 m:n laskentakeskiarvoilla

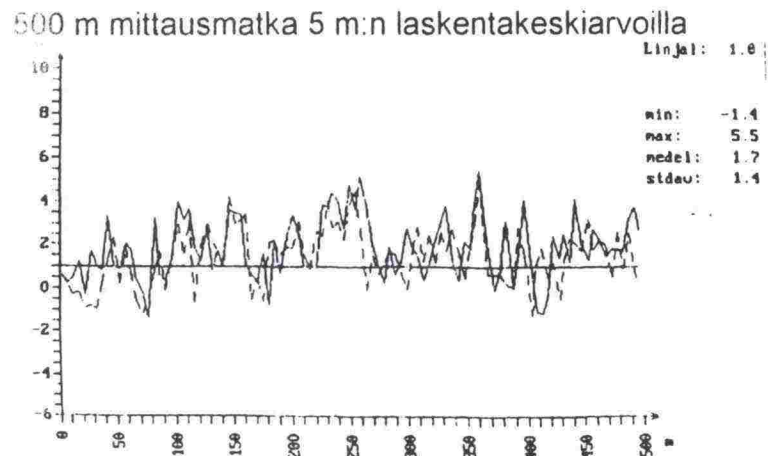


Kuva 19. DOR 500 metrin mittausmatka 1 metrin laskentakeskiarvoilla.

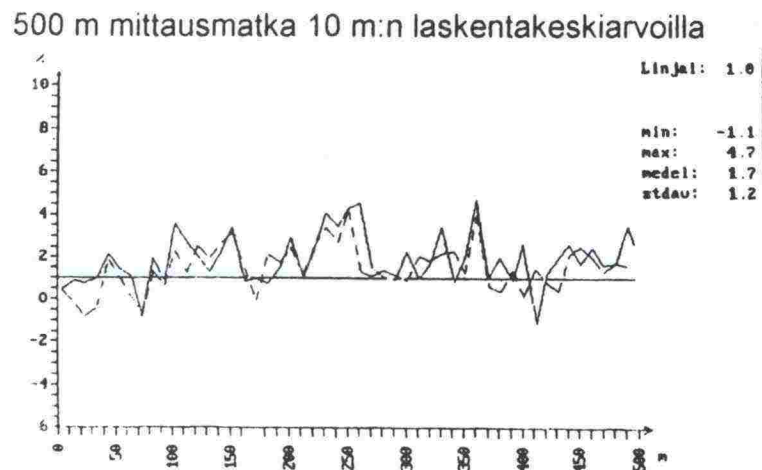
500 m mittausmatka 2 m:n laskentakeskiarvoilla



Kuva 20. DOR 500 metrin mittausmatka 2 metrin laskentakeskiarvoilla.



Kuva 21. DOR 500 metrin mittausmatka 5 metrin laskentakeskiarvoilla.

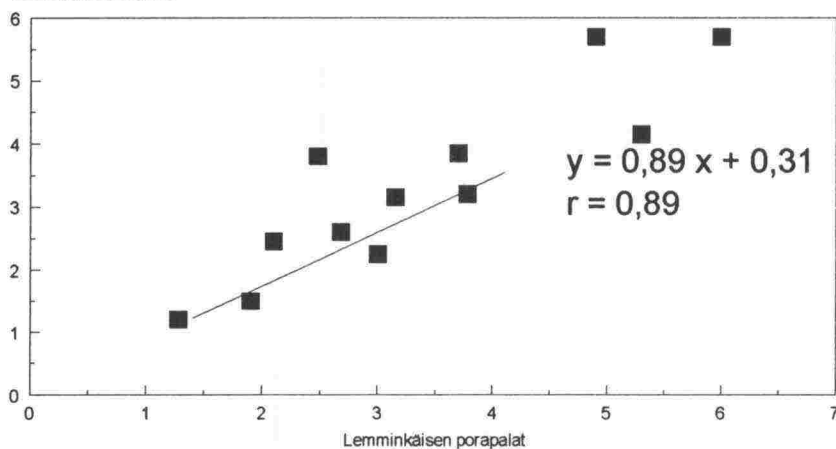


Kuva 22. DOR 500 metrin mittausmatka 10 metrin laskentakeskiarvoilla.

Porapaloista määritettyjen tyhjätila-arvojen hajonta on 0,70...0,80 %-yksikköä. Vastaavasti eri laboratorioissa tehdyt tyhjätilatulokset eroavat keskenään vaikka poraukset on tehty vain metrin etäisyydellä toisistaan kais-tan pituussuunnassa. Tyhjätila voi vaihdella jo erittäin lyhyilläkin välimat-koilla, jonka osoittaa edellä olevat kuvaajat. Kuvassa 23 on esitetty regres-sio-jakauma Lemminkäisen ja Tielaitos/Helsingin kaupungin laboratorioi-den tuloksista.

Lemminkäisen ja TIEL/HKR:n porapalojen regressio

TIEL/HKR:n porapalat



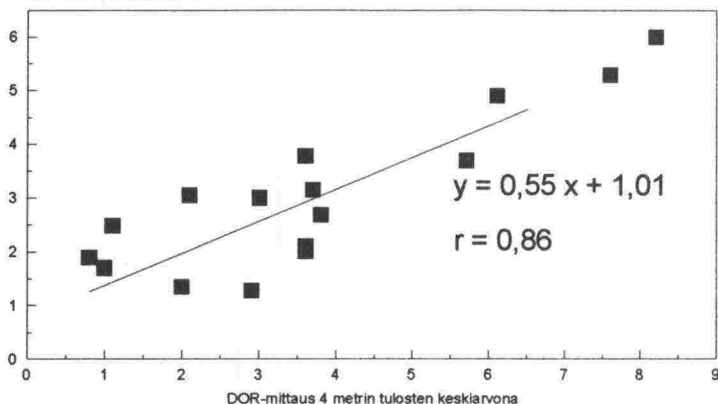
Laatuinsinööri Oy

Kuva 23 Lemminkäisen ja Tielaitos/HKR:n laboratorioden porapalatulosten regressio.

Tulosten riippuvuus ja korrelaatio on varsin hyvä. Suurimmat erot ovat tulleet $> 5\%$ tyhjätila-arvoilla, joka osoittaa massan olevan mittausalueella epähomogeenistä tai tiivistyö on osittain epäonnistunut. Lähes vastaavaan korrelaatioon on päästy, kun on verrattu DOR:n 4 metrin mittausten keskiarvotuloksia eri laboratorioista saatuihin tuloksiin.

DOR 4m ka. ja LOY:n lab. porapalojen regressio

LOY:n laboratorion porapala

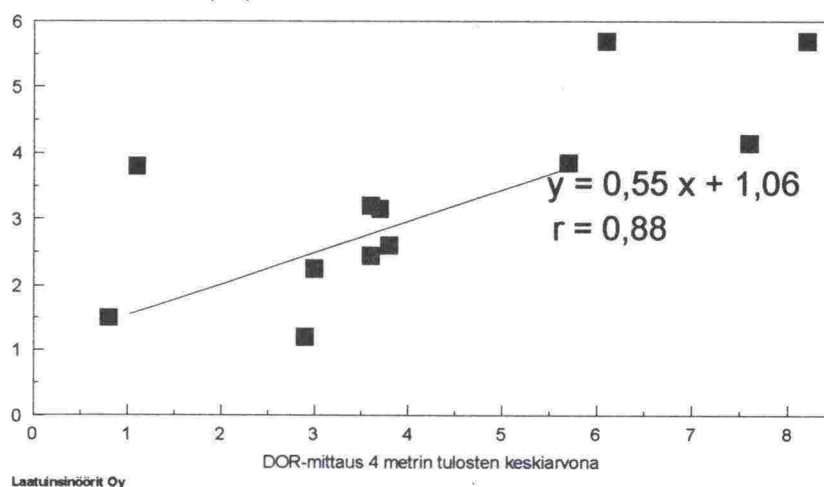


Laatuinsinööri Oy

Kuva 24 . DOR:n 4 metrin mittauksen keskiarvotulosten ja Lemminkäisen laboratorion porapalatulosten regressio.

DOR 4m ka. ja HKR:n lab. porapalojen regressio

TIEL/HKR:n laboratorion porapala



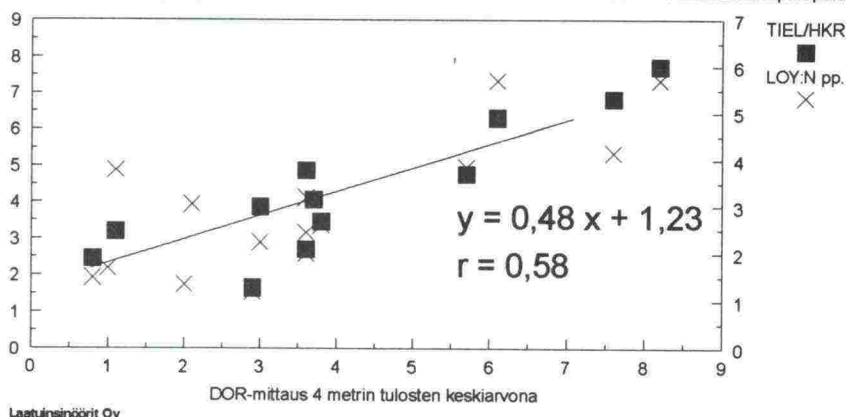
Kuva 25. DOR:n 4 metrin mittauksen keskiarvotulosten ja TIEL/HKR:n laboratorion porapalatulosten regressio.

Tulosten riippuvuus ja korrelaatio ovat täsmälleen samanlaiset. Tämän perusteella eräs hyvin olennainen virhelähde tuloksia analysoitaessa saattaa olla laboratorioissa tehty virheet. Niiden osoittaminen on erittäin hankalaa, koska yleensä ei ole mitään referenssiä joihin tuloksia voitaisiin verrata.

DOR 4m ka. ja LOY ja TIEL/HKR:n porapala tulosten regressio

LOY:n laboratorion porapala

TIEL/HKR: laboratorion porapala

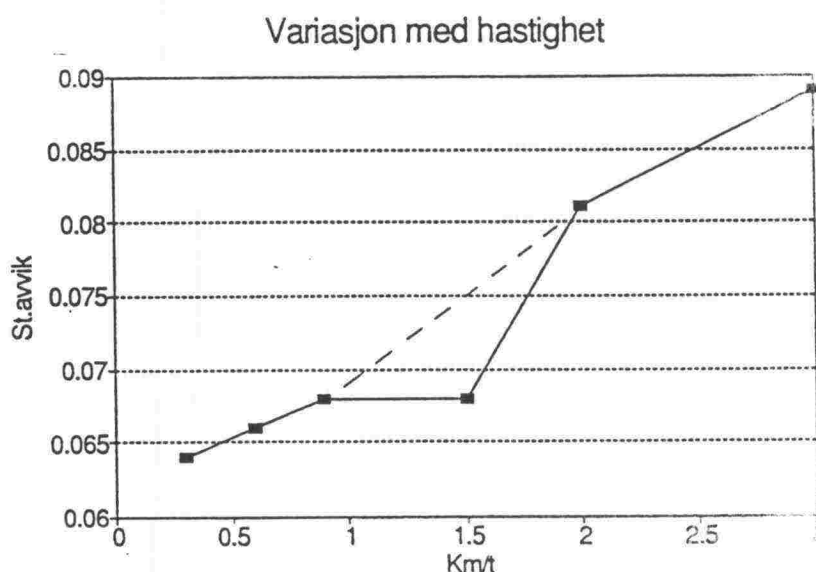


Kuva 26. DOR:n 4 metrin mittauksen keskiarvotulosten, Lemminkäisen laboratorion ja TIEL/HKR:n laboratorion porapalatulosten regressio.

Korrelaatio on pienentynyt edellisistä huomattavasti, joka johtuu osittain DOR tulosten hajonnasta, mutta myös porapalatulosten hajonnasta. DOR:n ja porapalojen yksittäiset tulokset korreloivat hyvin keskenään 2%... 6 % tyhjätila-arvoilla. Riippuvuus ei ole suoraan yksi yhteen, joka pienentää tulosten korrelaatiota. Tulokseen vaikuttavat yhtäläillä porapalojen kuin DOR-mittaustulosten hajonta.

Regression tulos ja korrelaatiokerroin osoittavat myös sitä, ettei porapalojen hajonta-arvot aina anna riittävän luotettavaa kuvaa päällysteen tyhjätilasta ja laadusta. Niiden perusteella saadaan vain suppea kuva yhdeltä poikkileikkaukselta mittausalueelta 1...3 viikon kuluttua päällystystöiden päätyttyä. Vastaava tilanne olisi, jos radiometrisillä mittauslaitteillakin tehtäisiin vain pistemittauksia.

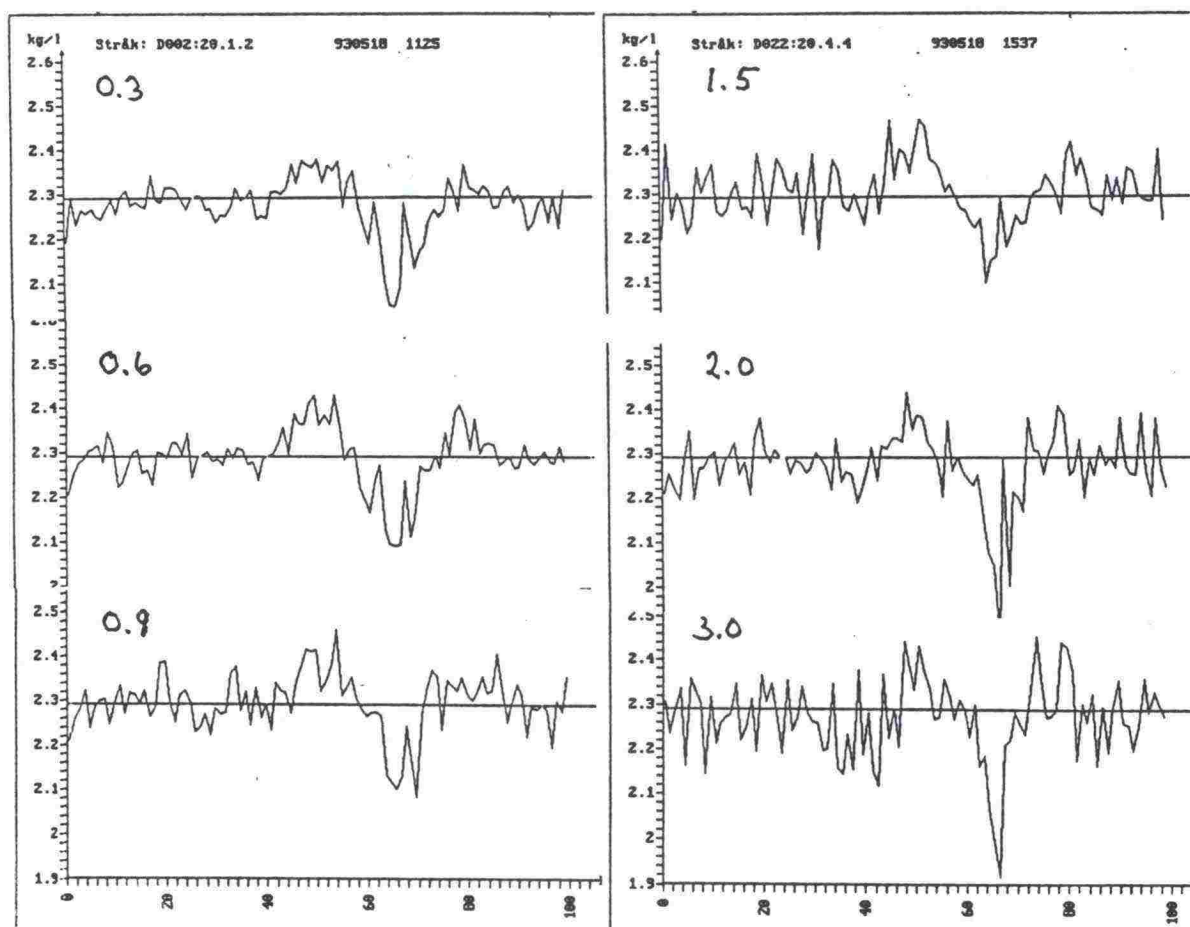
Norjalaisten Asphalt Industriens Laboratorium'n tekemässä raportissa on tarkasteltu mittausnopeuden vaikutusta mittaustulokseen jatkuvilla mittauksilla. Tutkimustulosten perusteella mittausnopeudella on suora yhteys mittaustulosten keskihajontaan, joka ilmenee kuvasta 27.



Kuva 27. Mittausnopeuden vaikutus tilavuuspainotulosten keskihajontaan.

Kuvaaja poikkeaa suorasta linjasta 1,0...1,5 km/h mittausnopeudella. Tutkimuksessa ei ole tarkemmin käsitelty mistä poikea johtuu, mutta tältä osin kannattaisi suorittaa lisätutkimuksia ja selvittää optimaalinen mittausnopeus. Jos mittausnopeus voitaisiin nostaa 1,0 km/h 1,5 km/h nopeuttaisi se huomattavasti mittaustyötä ja sitä kautta säästäisi kustannuksia etenkin pitkillä päällystyskohteilla.

Kuvassa 28 on tulosteet eri mittausnopeuksista 0,3...3,0 km/h.



Kuva 28. Tulosteet eri mittausnopeuksista 0,3...3,0 km/h.

Kuvaajat ovat täysin identtisiä 0,3...0,9 km/h nopeuksilla, jonka jälkeen keskinäiset erot alkavat kasvaa. Näiden kuvaajien perusteella optimaalinen mittausnopeus on jossain 0,9...1,5 km/h välillä, jota voidaan samalla pitää mittausnopeuden ohjearvona.

Tutkimustulokset osoittavat, että DOR-mittarilla pystytään mittaamaan tyhjätiloja eri päällystetyypeillä porapalatuloksia vastaavilla keskihajonta-arvoilla. Päällysteestä saadaan lisäksi tietyltä mittauslinjalta selkeä käsitys tyhjätilan vaihteluista, jonka perusteella pystytään arvostelemaan päällysteen homogeenisuutta aikaisempaa paremmin.

Mittaria voidaan käyttää näiden perusteiden pohjalta päällystystyömailla työtä ohjaavana ja laatuavarmistavana laitteena. Tutkimustulosten perusteella mittarin tarkkuus riittäisi todennäköisesti myös päällysteen laadunarvosteluun, jos tilaajan ja rakentajan välillä sovittaisiin laadunarvostelun peruseriaatteista.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Tutkimus on osoittanut, että porapalojen sijasta tyhjätila voidaan määrittää myös radiometrisillä mittareilla. Laitteiden käytön suhteen on oltu varsin ennakkoluuloisia, joka on johtunut niiden antamista ristiriitaisista tuloksista. Tämän raportin yhtenä tarkoituksena on ollut muokata ihmisten ennako-asenteita mittareita kohtaan.

Raportissa on käsitelty kahta rakennetta rikkomatonta mittaria, joista Troxler on ollut jo aikaisemmin käytössä. Laitteiden toimintaperiaate on jokseenkin samanlainen, kuitenkin mittaukset eroavat huomattavasti keskenään. DOR-mittarilla voidaan suorittaa jatkuvia ja pistemittauksia, kun Troxler on kehitetty vain pistemittausta varten.

Mittauksetulokset ovat olleet parhaillaan porapalatulosten kanssa samaa luokkaa niin absoluuttisen- kuin hajonta-arvojenkin suhteen. Kuitenkin pistemittauksetulos on vain irrallinen lukema riippumatta siitä onko se saatu porapalasta vai jonkin mittarin avulla. Tuloksen referenssiarvot ovat yleensä erittäin vähäisiä, koska porapaloja tutkitaan vain kahden kilometrin välein ja pienistä kohteista ei porata ollenkaan. Pistemittauksia voidaan suorittaa tarvittaessa tiheästikin, mutta menetelmä on jatkuvaan mittaukseen verrattuna erittäin hidas.

DOR-mittari on tuonut uusia ulottuvuuksia tyhjätilamittauksiin jatkuvan mittausominaisuuden johdosta. Laite mittaa metrin välein tyhjätilaa mittauslinjalta, jolloin saadaan huomattavasti selkeämpi käsitys tulosten vaihtelusta eri mittauskohdissa ja pystytään laskemaan tilastolliset tunnusluvut suuremman otoksen perusteella, jolloin tulosten luotettavuus paranee. Jos pistemittauslaitteet ovat ensimmäisen sukupolven rakennetta rikkomattomia tyhjätilamittareita, voidaan DOR-mittaria nimittää toisen sukupolven laitteeksi.

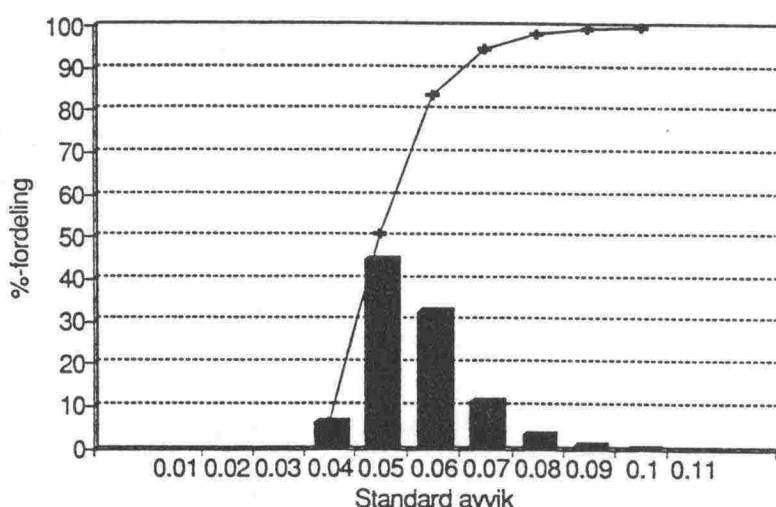
Tulokset osoittavat selkeästi, että päällystemassa ei ole tasalaatuista vaan jo lyhyilläkin välimatkoilla saattavat tulokset erota huomattavasti keskenään. Jos pistemittaukset suoritetaan metrin välein toisistaan saattaa

JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

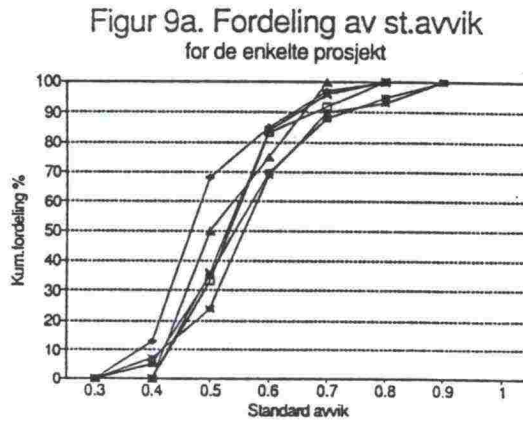
kahden tuloksen ero olla jopa 1 %-yksikkö. Kuka on se asiantuntija, joka pystyy kertomaan kumpi tuloksista kuvaa paremmin päällysteen keskimääräistä laatua seuraavan kahden kilometrin osalta, kumpi tuloksista on oikea ja kumman tuloksen mukaan tehdään arvonmuutos vai tehdäänkö Salomonin tuomio ja lasketaan keskiarvo? DOR-mittarin jatkuvamittaus antaa mahdollisuuden seurata tyhjättilan muutoksia koko kahden kilometrin matkan osalta ja helpottaa päätöksen tekoa laadunarvostelussa.

Nykyisissä arvonmuutosperusteissa ei ole vielä minkäänlaisia perusteita päällysteen tyhjättilan laadunarvostelemiseen rakennetta rikkomattomin menetelmin. Tielaitoksen työryhmä on käsitellyt eri laatutekijöitä raporteissaan "Tilastolliset menetelmät laativastuurakentamisessa 1, 2, 3 ja 4" vuonna 1991. Raportit osoittavat päällysteen tyhjättilan toteuttavan tyydyttävästi normaalijakauman funktiota. /4,5/ Vastaava tulos voidaan havaita myös norjalaisten tekemästä tutkimuksesta. Kuvissa 29, 30 ja 31 on esitetty koko tutkimuksen ja kahden yksittäisen kohteen tulosten keskihajonnan prosentuaalisen ja kumulatiivisen kertymän.

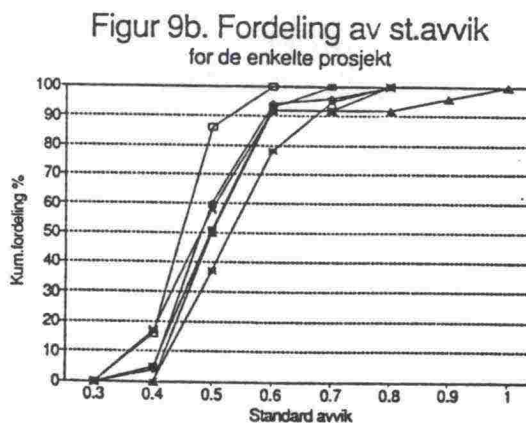
for 397 delstrekninger



Kuva 29. 397 kohteen keskihajonnan prosentuaalinen jakauma.



Kuva 30. Yhden kohteen mittauksen keskihajonnan prosentuaalinen kertymä.

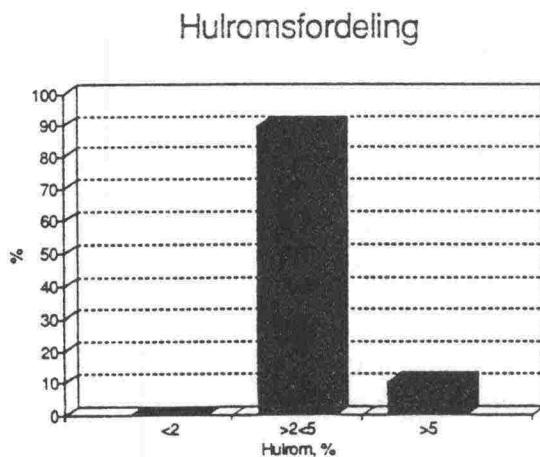


Kuva 31. Yhden kohteen mittauksen keskihajonnan prosentuaalinen kertymä.

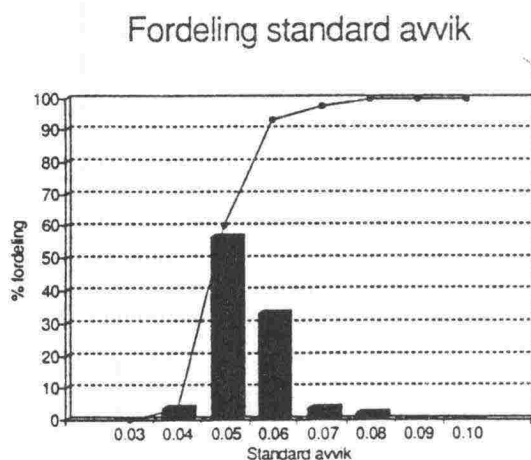
Kuvassa 29 on tarkasteltu norjalaisten tekemän tutkimuksen kaikkien mittauskohteiden keskihajonnan prosentuaalista jakaumaa. Tulos osoittaa arvojen jakautuneen kohtalaisen hyvin normaalijakauman mukaisesti, tulos on positiivisesti jakautunut. Jos mittauksien tarkkailuväliä tihennettäisiin, olisivat tulokset jakautuneet tasaisemmin. Kuvien 30 ja 31 tulokset vastaavat täysin normaalijakauman kumulatiivisen frekvenssin kertymää.

JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Näiden perusteella voitaisiin asiasta suorittaa jatkoselvitys, jossa tyhjättila oletettaisiin normaalijakautuneeksi funktioksi, jota hyödynnettäisiin laadunarvostelussa. Lähtökohtana voitaisiin käyttää mallia, jossa 90 % mita-
tuista arvoista pitäisi olla vaatimusrajojen sisäpuolella, jonka jälkeen perittäisiin arvovähennys ylittävältä osalta. Kuvissa 32 ja 33 on esitetty mittausarvojen jakauma ja hajonta-arvojen kertymät.



Kuva 32. Kohteen tyhjättilamittausten jakauma.



Kuva 33. Kohteen tyhjättilamittausten keskihajonnan kertymä.

JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Kohteessa on tyhjätilavaatimus 2...5 % ja mitatuista arvoista 90 % täyttää asetetun vaatimuksen. Vastaava asia voidaan todeta myös kuvasta 33, jossa keskihajonnan frekvenssi on piirretty kumulatiiviseksi kuvaajaksi.

Laskentamenettelystä ei ole vielä käytännön kokemuksia, joiden perusteella voitaisiin arvostella sen toimivuutta laadunarvostelussa. Nykyisin porapalatulosten perusteella arvonmuutos peritään koko päällysteväliltä. Tässä menetelmässä arvonmuutos laskettaisiin keskimääräisen tyhjätilan perusteella ja/tai lisäksi laskettaisiin neliökohtainen arvonmuutos niiden päällysteneliöiden osalta, jotka ylittävät laatuvaatimukset. DOR-mittauksen avulla pystyttäisiin määrittämään noin neliömetrin tarkkuudella alueen pinta-ala.

Tulevaisuudessa vaaditaan päällystealalla asennemuutosta, jotta radiometrisiä mittauslaitteita pystyttäisiin täysipainoisesti hyödyntämään. Tämä edellyttää, että laitteita tullaan käyttämään enenevässä määrin myös laadunarvostelussa ja arvosteluperusteet muokataan esimerkiksi edellä esitetyn tyyppiseksi. Massan tiheyden määrittämiseen pitäisi soveltaa huomattavasti enemmän teoreettisia määrittämenetelmiä, kuten ICT-tutkimusta ja laskennallista määrittäystä.

Tutkimus on osoittanut selvästi, ettei porapaloista määritetty tyhjätila-arvo ole absoluuttinen vaan siihen sisältyy tiettyjä virhetekijöitä, kuten radiometrisiin määrittäysmekanismiin. Porapalatulos on eräänlainen pistemittaus, joka ei anna välttämättä riittävän laajaa käsitystä päällysteen tyhjätilasta. Tulos saattaa olla vain satunnainen arvo yhdestä mittauspisteestä, joka voi olla metrin päästä poratusta palasta aivan toinen.

Porapalasta aiheutuvat poraus-, pakkaus-, lähetys- ja tutkimuskustannukset ovat 1500...2500 markkaan laboratorion ja työmaan sijainnista riippuen. Samalla summalla voitaisiin tyhjätila määrittää 1,5...2,5 kilometrin matkalta DOR-mittarilla metrin välein. Vastaavasti Troxler-mittari voitaisiin vuokrata työmaalle käyttöön 3...4 viikon ajaksi samalla summalla. Radiometriset mittauslaitteet ovat kilpailukykyisiä kustannuksiltaan porapaloihin verrattuna.

- /1/ Asfalt Industriens Laboratorium. 1993, Rapport nr. 1, Utprovning av rullande isotopmålen (DOR), Hövik, Norge, 23 s.
- /2/ Pohjola P. 1994, Raportti DOR-tiiviysmittarin esikokeilusta kesällä 1993, Helsinki, Suomi, 26 s.
- /3/ Tielaitos. 1993, Päällystystyöt, Työselitykset ja laatuvaatimukset, Helsinki, Suomi, 46 s. ISBN 951-47-6966 X
TIEL 2212802-93
- /4/ Tielaitos, tuotannon ohjaus, 1991, Tilastolliset menetelmät laatuvaaturakentamisessa 2, Helsinki, Suomi, 47 s.
ISBN 951-47-4986-3, TIEL 2223514.
- /5/ Tielaitos, tuotannon ohjaus, 1991, Tilastolliset menetelmät laatuvaaturakentamisessa 3, Helsinki, Suomi, 43 s.
ISBN 951-47-5009-8, TIEL 2223515.
- /6/ Troxler Electronic Laboratories inc. Troxler 4640 B asfaltin ohutkerrosmittarin käyttäjän käsikirja, käännös Helsinki, Suomi, 52 s.

Tyhjätila tulosten vertailutaulukko

Tyhjättila mittaukset kesän -93 aikana											1 / (7)
Kohde	Pl.	Porapala		Troxler							
nro		Tyhjättila %	Tyhjättila %	abs.ero	suht.ero	tyhjät.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
300	5560	3,50	3,45	0,05	1,4%	0,24	4.00	4	0.5	AB 18	
300	5580	3,50	3,79	-0,29	-8,3%		4.00	4	0.5	AB 18	
300	5580	3,80	4,38	-0,58	-15,3%		4.00	4	0.5	AB 18	
300	5980	3,10	2,66	0,44	14,2%		4.00	4	0.5	AB 18	
300	5980	3,10	3,06	0,04	1,3%		4.00	4	1.0	AB 18	
300	5980	3,10	3,39	-0,29	-9,4%	0,37	4.00	4	2.0	AB 18	
300	5980	3,10	2,59	0,51	16,5%		4.00	4	2.0	AB 18	
300	6240	2,90	2,59	0,31	10,7%		4.00	4	0.5	AB 18	
300	6240	2,90	2,86	0,04	1,4%		4.00	4	2.0	AB 18	
300	6240	2,90	1,86	1,04	35,9%		4.00	4	1.0	AB 18	
300	6240	2,90	2,06	0,84	29,0%	0,46	4.00	8	1.0	AB 18	
300	6980	3,40	3,25	0,15	4,4%	0,33	4.00	4	0.5	AB 18	
300	6980	3,40	3,72	-0,32	-9,4%		4.00	4	0.5	AB 18	
300	7240	3,40	3,85	-0,45	-13,2%		4.00	4	0.5	AB 18	
300	7240	3,40	4,05	-0,65	-19,1%		4.00	8	0.5	AB 18	
300	7380	2,10	1,99	0,11	5,2%		4.00	4	0.5	AB 18	

Tyhjätila tulosten vertailu taulukko

Tyhjätila mittaukset kesän -93 aikana											2 / (7)
Kohde	Pl.	Porapala		Troxler							
nro		Tyhjätila %	Tyhjätila %	abs.ero	suht.ero	tyhjät.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
300	6260	5,70	5,44	0,26	4,6%		4.00	4	1.0	AB 18	sauma
300	6260	5,70	6,37	-0,67	-11,8%	0,66	4.00	4	1.0	AB 18	sauma
		Absoluuttisten erojen kh		0,48							
351	370	1,70	1,17	0,53	31,2%		5.00	4	0.5	SMA 18	
351	370	1,70	1,78	-0,08	-4,7%		5.00	4	0.5	SMA 18	
351	380	2,00	2,28	-0,28	-14,0%		5.00	4	0.5	SMA 18	
351	410	1,80	1,60	0,20	11,1%	0,46	5.00	4	0.5	SMA 18	
		Absoluuttisten erojen kh		0,35							
353	1180	2,10	1,49	0,61	29,0%		5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.
353	1260	2,10	2,07	0,03	1,4%		5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.
353	1340	2,10	2,79	-0,69	-32,9%		5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.
353	1400	2,10	1,49	0,61	29,0%		5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.
353	1440	2,10	1,36	0,74	35,2%		5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.
353	1530	2,10	2,01	0,09	4,3%		5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.
353	1530	2,10	2,72	-0,62	-29,5%	0,59	5.00	4	0.5	AB 20	ei pp.

Tyhjätila tulosten vertailu taulukko

Tyhjätila mittaukset kesän -93 aikana											3 / (7)
Kohde	Pl.	Porapala		Troxler							
nro		Tyhjätila %	Tyhjätila %	abs.ero	suht.ero	tyhjät.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
353	6780	2,40	2,18	0,22	9,1%	0,04	3.50	1	0.5	AB 20	
353	6780	2,40	2,14	0,26	10,8%		3.50	1	0.5	AB 20	
353	6780	2,40	2,11	0,29	11,9%		3.50	1	0.5	AB 20	
353	6780	2,40	2,11	0,29	12,1%		3.50	1	0.5	AB 20	
353	6780	2,40	2,07	0,33	13,7%		3.50	1	0.5	AB 20	
353	6780	2,40	2,15	0,25	10,6%		3.50	1	0.5	AB 20	
353	6780	2,40	2,08	0,32	13,2%	0,05	3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,09	0,31	13,0%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,06	0,34	14,3%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,09	0,31	13,0%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,03	0,37	15,6%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,07	0,33	13,9%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,00	0,40	16,5%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,06	0,34	14,3%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,07	0,33	13,7%		3.50	1	1.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,07	0,33	13,7%		3.50	1	1.0	AB 20	

Tyhjätila tulosten vertailu taulukko

Tyhjättila mittaukset kesän -93 aikana											4 / (7)
Kohde	Pl.	Porapala		Troxler							
nro		Tyhjättila %	Tyhjättila %	abs.ero	suht.ero	tyhjät.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
353	6780	2,40	2,07	0,33	13,7%	0,02	3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,04	0,36	15,0%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,00	0,40	16,7%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,03	0,37	15,4%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,04	0,36	14,8%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,05	0,35	14,7%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,03	0,37	15,2%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,07	0,33	13,9%		3.50	1	2.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,05	0,35	14,5%		3.50	1	4.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,03	0,37	15,4%		3.50	1	4.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,00	0,40	16,7%		3.50	1	4.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,00	0,40	16,7%		3.50	1	4.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,03	0,37	15,4%		3.50	1	4.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,01	0,39	16,3%		3.50	1	4.0	AB 20	
353	6780	2,40	2,00	0,40	16,5%		3.50	1	4.0	AB 20	

Tyhjätila tulosten vertailu taulukko

Tyhjätila mittaukset kesän -93 aikana											5 / (7)
Kohde	Pl.	Porapala		Troxler							
nro		Tyhjätila %	Tyhjätila %	abs.ero	suht.ero	tyhjät.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
186	5250	3,05	2,16	0,89	29,2%		4.00	4	0.5	AB 20	
186	5250	3,05	1,24	1,81	59,3%		4.00	4	0.5	AB 20	
186	5250	3,05	1,57	1,48	48,5%	0,47	4.00	4	1.0	AB 20	
113	1800	2,25	4,22	-1,97	-87,6%		5.00	10	0.5	AB 18	
113	1800	2,25	4,68	-2,43	-108,0%		5.00	10	0.5	AB 18	
113	2200	2,20	1,54	0,66	30,0%		5.00	4	1.0	AB 18	
113	2400	2,20	1,73	0,47	21,4%		5.00	4	1.0	AB 18	
113	1899	2,25	4,42	-2,17	-96,4%	1,72	5.00	4	1.0	AB 18	
53	3400	5,30	2,60	2,70	50,9%		4.00	10	0.5	SMA 18	
53	3474	5,30	1,88	3,42	64,5%		4.00	4	1.0	SMA 18	
53	4500	5,30	5,01	0,29	5,5%		4.00	4	1.0	SMA 18	
53	4500	5,30	6,34	-1,04	-19,6%		4.00	10	0.5	SMA 18	
53	6650	4,50	5,35	-0,85	-18,9%		4.00	10	0.5	SMA 18	
53	6660	4,50	5,54	-1,04	-23,1%		4.00	4	1.0	SMA 18	
53	7180	5,30	4,42	0,88	16,6%		2.54	10	0.5	SMA 18	
53	7180	5,30	4,62	0,68	12,8%		2.54	10	0.5	SMA 18	
53	7191	5,30	3,03	2,27	42,8%	1,84	2.54	4	1.0	SMA 18	

Tyhjätila tulosten vertailu taulukko

Tyhjätilamittaukset kesän -93 aikana											6 /(7)
Kohde	Pl.	Troxler									
nro		Tyhjätila %	Til.paino	abs.ero	suht.ero	til.p.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
4	17100	3,54	2,95	0,59	16,67%		4.00	4	2.0	SMA 18	
4	17100	3,54	3,48	0,06	1,69%	0,37	4.00	4	4.0	SMA 18	
		Absoluuttisten erojen kh		0,37							
21	12540	2,48	4,64				4.00	4	0.5	AB	N
21	12540	2,48	4,94			0,21	4.00	4	1.0	AB	N
21	13940	3,23	6,05				4.00	4	0.5	AB	N
21	13940	3,23	6,47			0,30	4.00	4	1.0	AB	N
350	3050		2400			21,80	2.54	4	0.5	SMA 18	
350	3050		2415			19,60	4.00	4	0.5	SMA 18	
350	3050		2443			4,40	6.00	4	0.5	SMA 18	
350	3050		2450			5,60	8.00	4	0.5	SMA 18	
350	3050		2458			2,90	10.00	4	0.5	SMA 18	
350	3050		2404			16,70	2.54	4	1.0	SMA 18	
350	3050		2429			5,30	4.00	4	1.0	SMA 18	
350	3050		2445			1,90	6.00	4	1.0	SMA 18	
350	3050		2454			5,30	8.00	4	1.0	SMA 18	
350	3050		2455			4,00	10.00	4	1.0	SMA 18	

Tyhjättila tulosten vertailu taulukko

Tyhjättilamittaukset kesän -93 aikana											7 I(7)
Kohde	Pl.	Troxler									
nro		Tyhjättila %	Til.paino	abs.ero	suht.ero	til.p.kh.	Kerrosp.	mitt. kpl	Min.	Pääll.	Muuta
350	3050		2408			6,20	2,54	4	2.0	SMA 18	
350	3050		2438			6,90	4,00	4	2.0	SMA 18	
350	3050		2445			2,60	6,00	4	2.0	SMA 18	
350	3050		2451			2,10	8,00	4	2.0	SMA 18	
350	3050		2456			1,70	10,00	4	2.0	SMA 18	
350	3050						2,54	4	4.0	SMA 18	
350	3050		2440			1,50	4,00	4	4.0	SMA 18	
350	3050		2448			2,60	6,00	4	4.0	SMA 18	
350	3050		2451			4,70	8,00	4	4.0	SMA 18	
350	3050		2457			1,00	10,00	4	4.0	SMA 18	

Tyhjätilatulosten vertailutaulukko

DOR-MITTAUSTULOSTEN VERTAILUTAULUKKO

DOR pistemittaus tulokset on saatu 4*1 min. keskiarvotuloksina koneita välillä liikuttamatta. Troxler pistemittaukset on tehty DOR-pistemittauskohdista. DOR "rullausmittaus tulokset" on saatu yhtäjaksoisella mittauskella ja tulokset on laskettu eri pi mittauskantojen keskiarvoina. Poraustulos on saatu mittauspisteen yli otettujen porakappaleiden keskiarvoina. LOY:n porakappaleet on otettu rakennuttajan porakappaleiden väleistä.

Kohde	PL	Troxler	DOR pis	DOR jatk. kokoväl		DOR jatkuva		Rak.poraus		Mass.	LOY		Mass.	Poraus
				5m:n ka	kh	2 m:n ka	4 m:n ka	TIEL/HKR	kh	ti.	poraus	kh	ti.	ka.
1	75	0,45	-0,57			-0,30	-0,60	0,00			0,70			
1	100	0,03	1,75			2,50	2,00	0,00			1,35			
1	300	1,87	2,12			1,20	1,00	0,00			1,70			
1	365	2,16	1,63			5,00	3,60	0,00			2,00			
1	400	0,86	1,26			3,00	2,10	0,00			3,05			
1	ka	1,07	1,24	1,80	1,40	2,28	1,62	0,00		2,447	1,70	0,90	2,455	
2	100	9,80	8,30			8,10	8,20	6,00			5,70			
2	300	6,40	5,20			2,80	6,10	4,90			5,70			
2	400	5,40	5,40			7,00	7,60	5,30			4,15			
2	ka	7,20	6,30	6,80	1,40	6,97	7,30	5,40	0,60	2,428	5,20	0,80	2,428	5,30

Tyhjätilatulosten vertailutaulukko

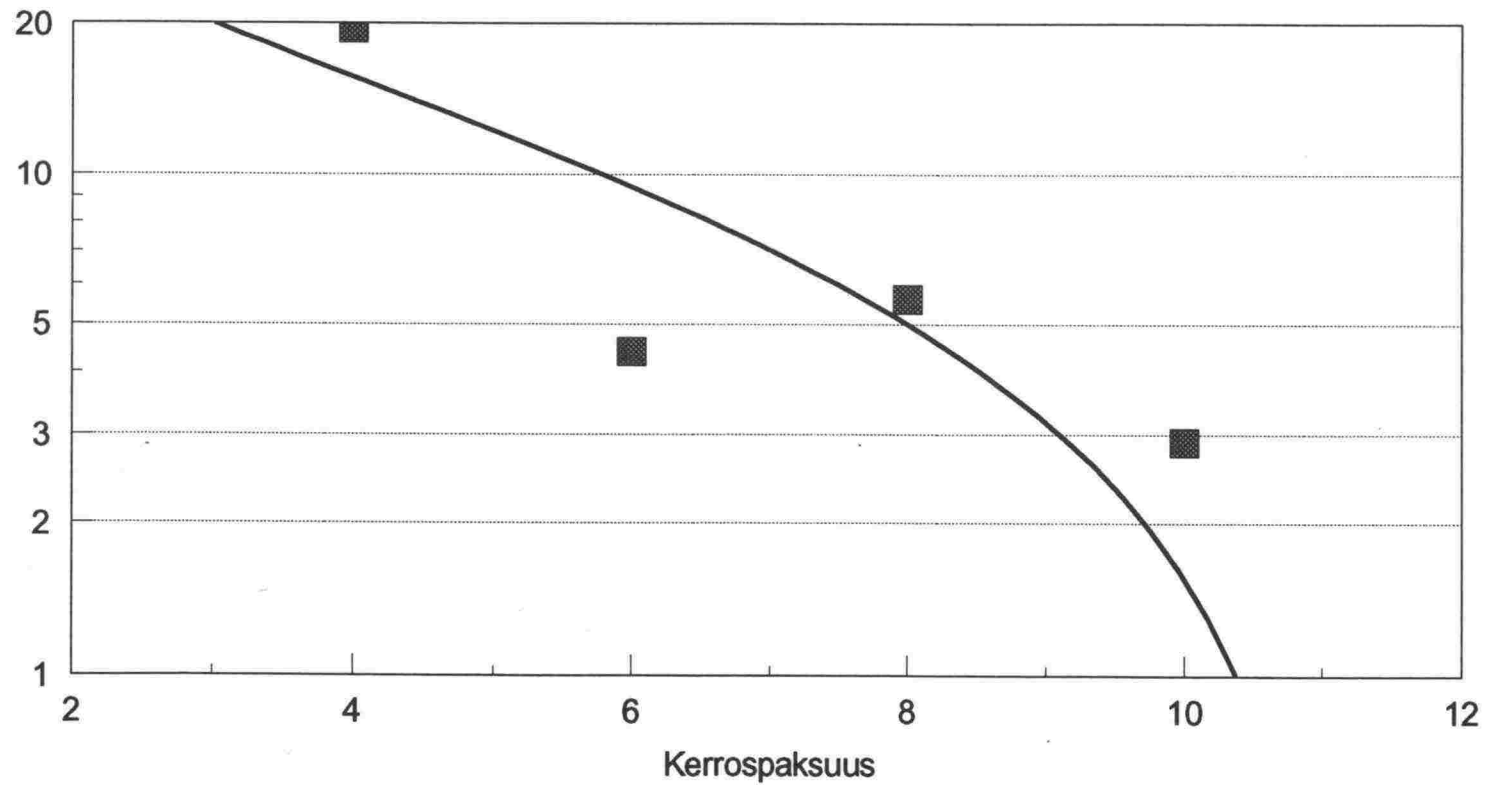
Kohde	PL	Troxler	DOR pis	DOR jatk. kokoväl		DOR jatkuva		Rak.poraus		Mass.	LOY		Mass.	Poraus
				5m:n ka	kh	2 m:n ka	4 m:n ka	TIEL/HKR	kh	ti.	poraus	kh	ti.	ka.
3	250	3,56	4,43			3,80	3,70	3,15			3,15			
3	350	4,21	5,83			6,40	5,70	3,70			3,85			
3	ka	3,89	5,13	3,40	1,80	5,10	4,70	3,60	0,50	2,461	3,50	0,40	2,473	3,55
4	0	4,50	4,18			3,00	3,00	3,00			2,25			
4	300	1,65	4,22			3,40	3,60	2,10			2,45			
4	500	1,81	2,95			-1,20	-1,50	0,70			0,75			
4	ka	2,65	3,78	2,40	1,80	1,73	1,70	1,90	1,10	2,445	1,80	0,80	2,455	1,85
6	52,5	1,49	-1,09			-1,45	-0,80	-0,30			0,90			
6	165	1,82	-3,60			-2,50	-2,10	0,13			0,20			
6	250	1,43	-0,19			1,40	0,80	1,90			1,50			
6	ka	1,58	-1,63	-0,70	1,30	-0,85	-0,70	0,50	1,10	2,435	0,90	0,60	2,438	0,70
7	84	0,00	0,00			2,60	2,90	1,28			1,20			
7	108	0,00	6,64			5,50	3,60	3,78			3,20			
7	265	0,00	-4,30			-0,60	0,20	0,96			1,00			
7	ka	0,000	1,170	2,600	2,500	2,500	2,230	2,000	1,400	2,622	1,800	1,100	2,626	1,900
8	40	0,00	4,90			1,70	1,10	2,48			3,80			
8	145	0,00	4,90			4,40	3,80	2,68			2,60			
8	ka	0,00	4,90	2,60	2,20	3,05	2,45	2,60	0,80	2,531	3,20	0,70	2,529	2,90

Til. painon keskihajonnan suhde kerrospaksuuteen

mittausaika 0,5 min.

Troxler

Tilavuuspainon keskihajonta



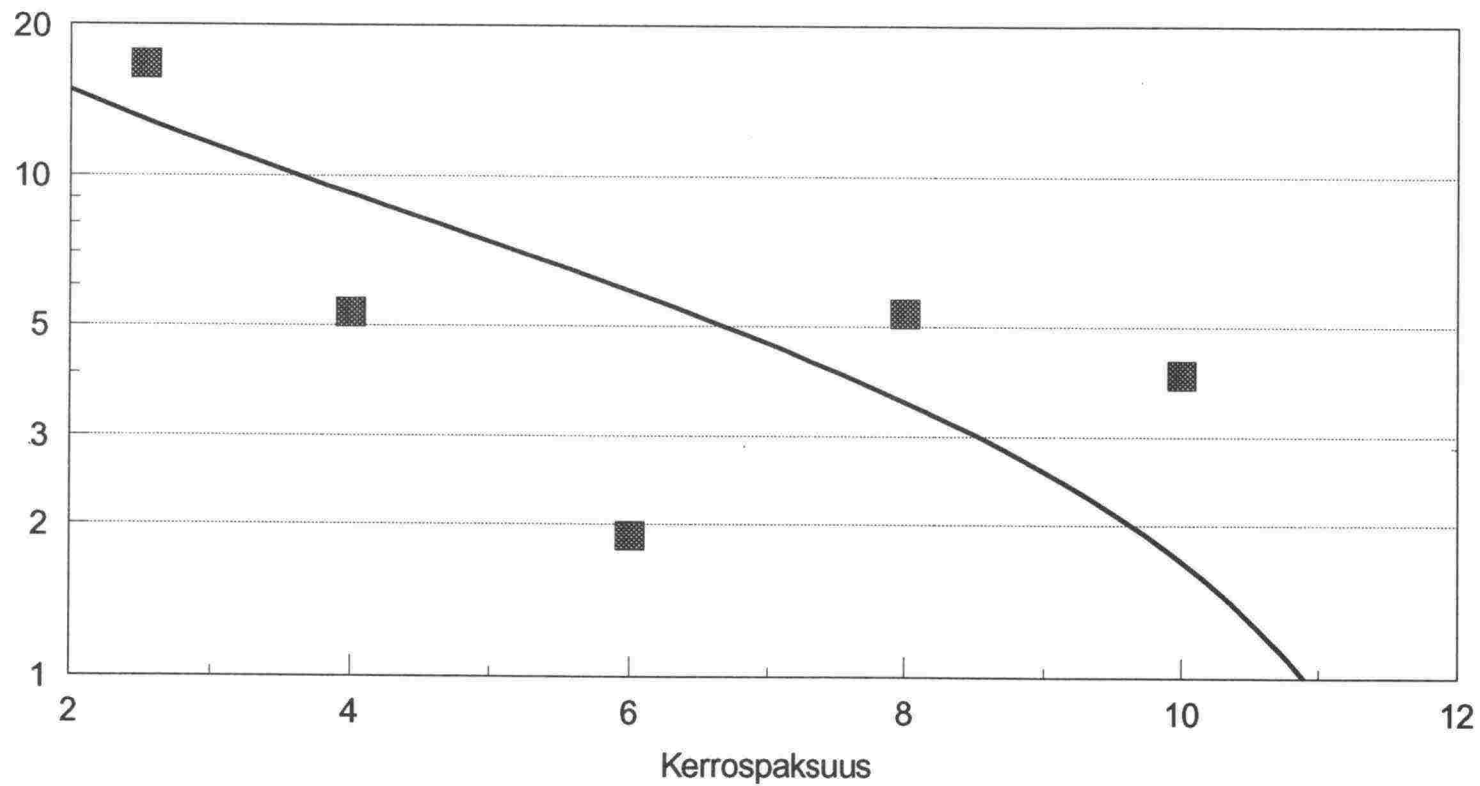
Laatuinsinööri Oy

Til. painon keskihajonnan suhde kerrospaksuuteen

mittausaika 1,0 min.

Troxler

Tilavuuspainon keskihajonta



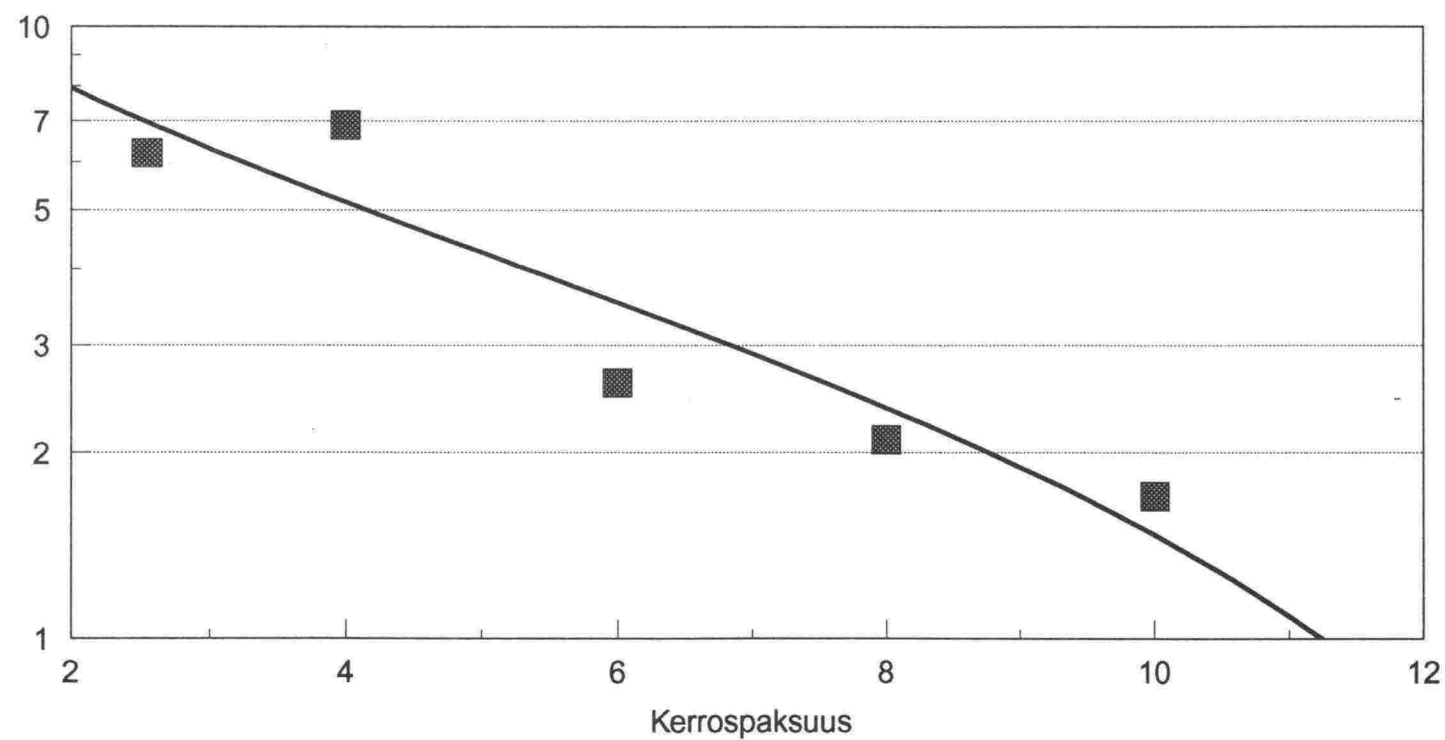
Laatuinsinöörit Oy

Til. painon keskihajonnan suhde kerrospaksuuteen

mittausaika 2,0 min.

Troxler

Tilavuuspainon keskihajonta



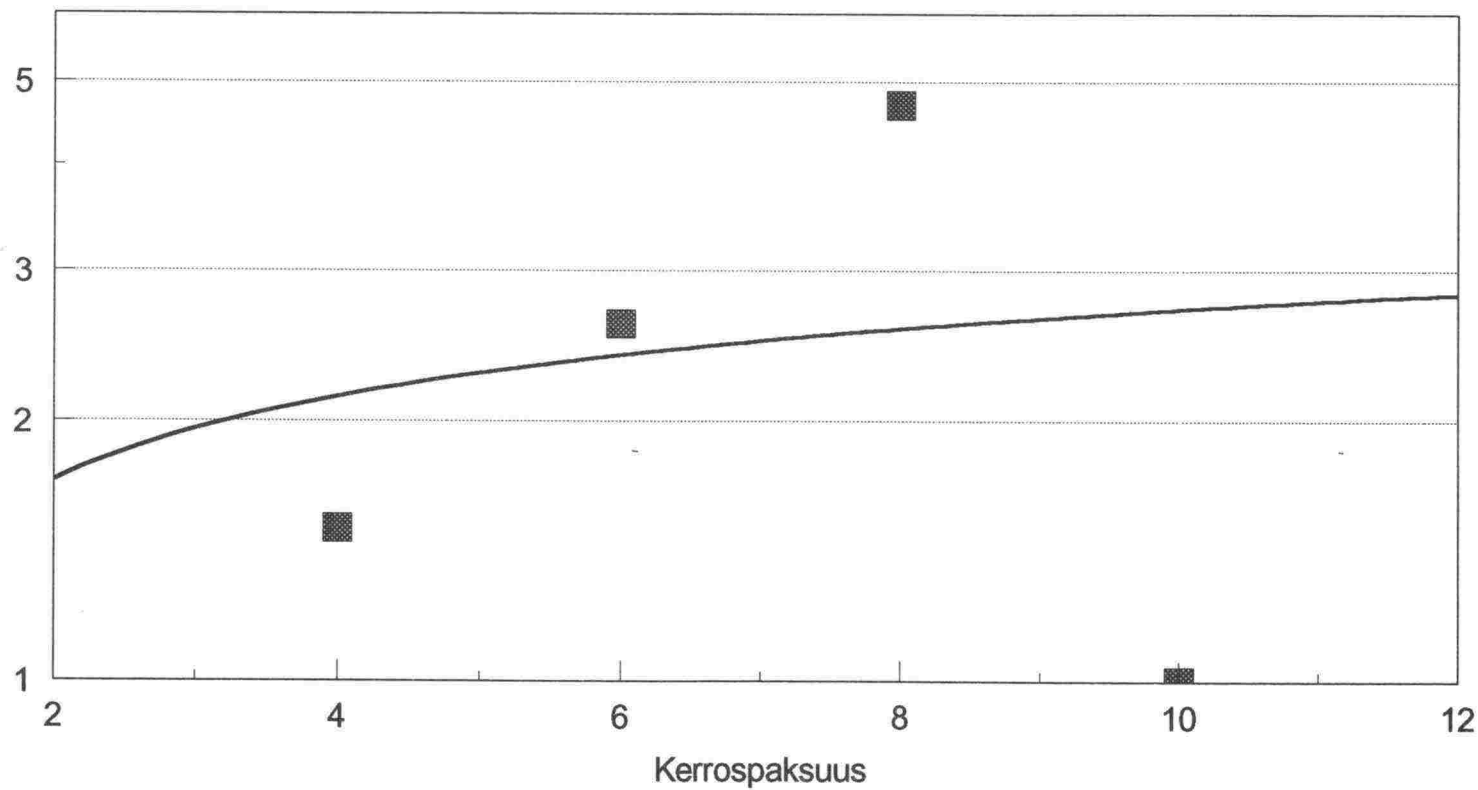
Laatuinsinöörit Oy

Til. painon keskihajonnan suhde kerrospaksuuteen

mittausaika 4,0 min.

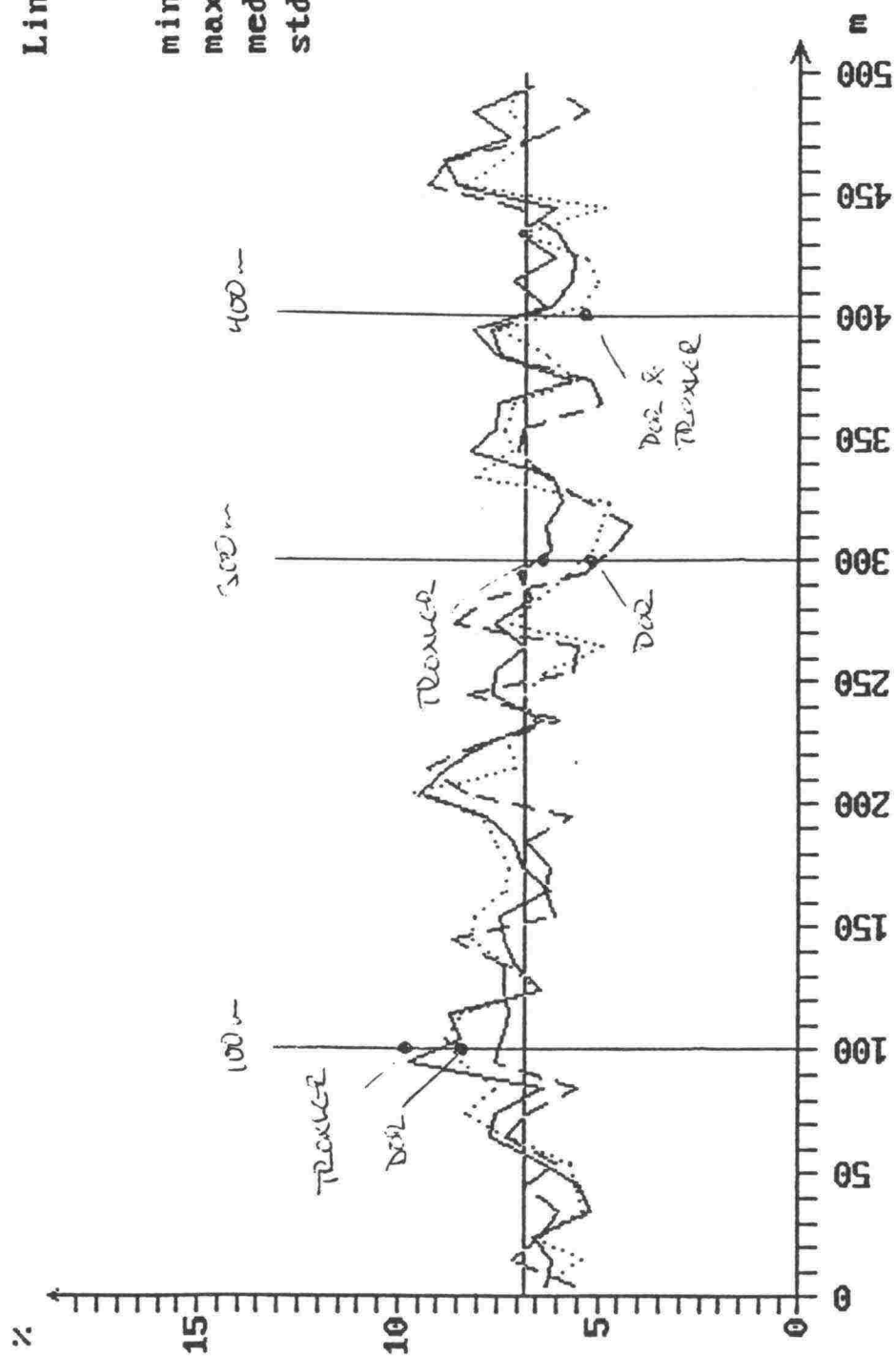
Troxler

Tilavuuspainon keskihajonta



Laatuinsinöörit Oy

Linjal: 6.8
min: 4.2
max: 9.7
medel: 6.8
stdav: 1.1

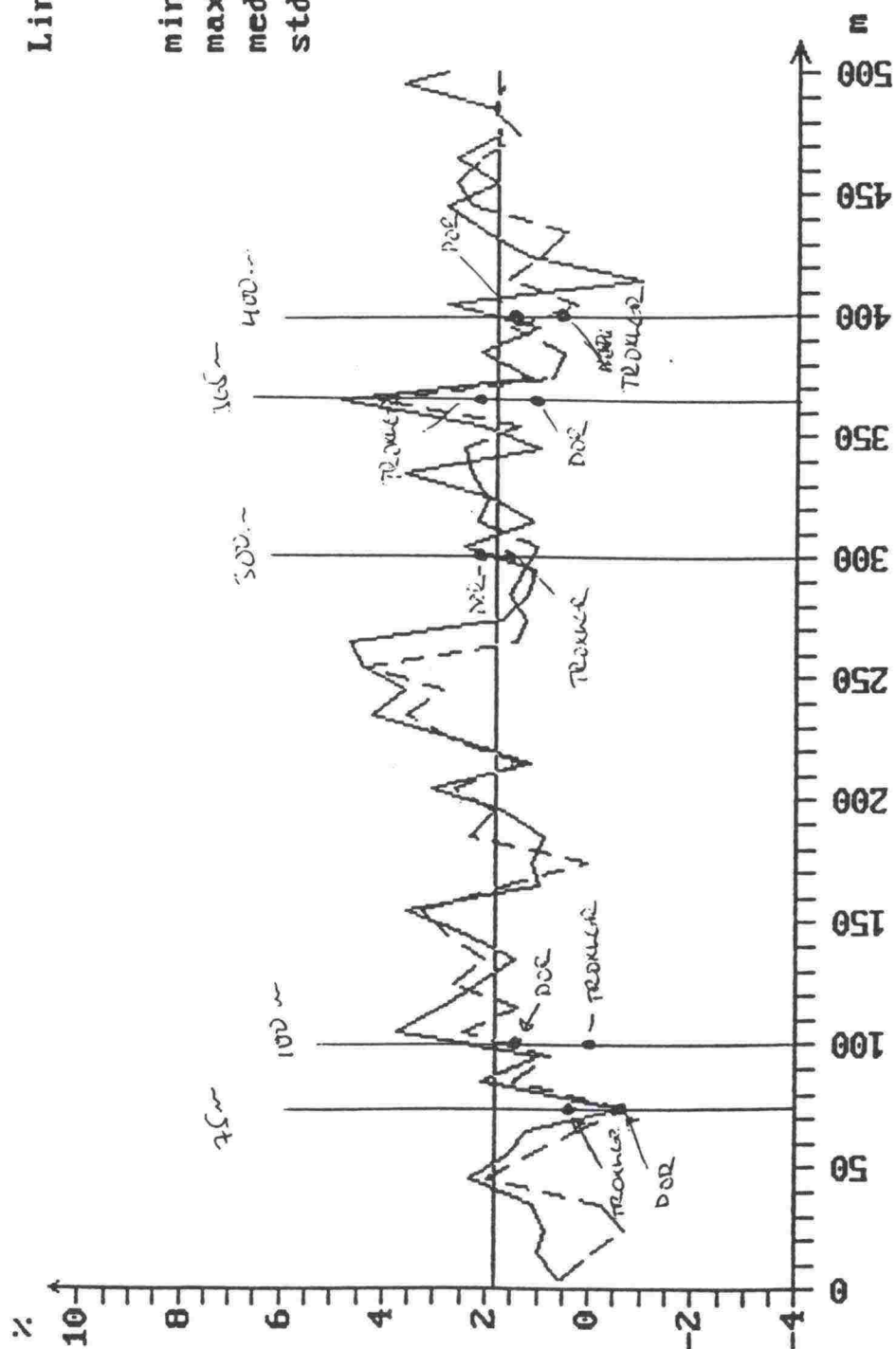


Kurva, Hålrumsvolym

CCS - International AB

Linjal: 1.8

```
min: -1.0
max: 4.8
medel: 1.8
stdav: 1.2
```



TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 74/1993 Dynaaminen rasitusindeksi (DRI). TIEL 3200198
- 75/1993 Pientieverkon kunnossapidon kehittäminen. TIEL 3200199
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 78/1993 Etelä-Suomen emulsiokoetiet 1993. TIEL 3200202
- 79/1993 Emulsiopäälystetekokeilut 1992-1993. TIEL 3200203
- 80/1993 Kelin vaikutus ajokäyttäytymiseen ja liikennevirran ominaisuuksiin. TIEL 3200204
- 81/1993 Vt 12 Veittostensuon syvästabilointi; tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäälysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 83/1993 Tutkimus pölyntorjunnasta murskaamoilla. TIEL 3200207
- 84/1993 Kuusamon keskustan liikennejärjestelut ja ympäristö; Yleissuunnittelu asukkaiden näkökulmasta. TIEL 3200208
- 85/1993 Kuusamon keskustan liikennejärjestelyt ja ympäristö; Yleissuunnittelun osallistumismenettely. TIEL 3200209
- 86/1993 Teiden suolauksen vähentäminen Kuopion tiepiirissä; Vaikutukset talvella 1992-1993. TIEL 3200210
- 87/1993 Kuljettajakäyttäytyminen kaarre- ja jonoajossa. TIEL 3200212
- 88/1993 Tielaitoksen liikenteen informaatiopalvelujen kehittämistutkimus. TIEL 3200215
- 1/1994 Suunnittelustrategia. Tiehallinto
- 2/1994 Ihminen ja tie; Tien kokeminen ja tie kirjallisuudessa. TIEL 3200211
- 3/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmilla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213
- 4/1994 Salaojan ympärysaineen vaikutus raudan saostumisessa. TIEL 3200214
- 5/1994 Syyt yritysten sijoittumiseen liikenteellisten solmukohtien läheisyyteen. TIEL 3200216
- 6/1994 Helsingin seudun pääväylien liikenteen hallinta. TIEL 3200217
- 7/1994 Tien pohja- ja päällysrakenteet, tutkimusohjelma (TPPT), Tutkimus-suunnitelma vuosille 1994-2000. TIEL 3200218
- 8/1994 Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219
- 9/1994 Liikenteen vaatima energia ja kaupunkirakenne. TIEL 3200220
- 10/1994 Rakennussuunnittelun kehittäminen; Selvitys rakennussuunnittelun sisällyttämisestä rakentamiseen. TIEL 3200221